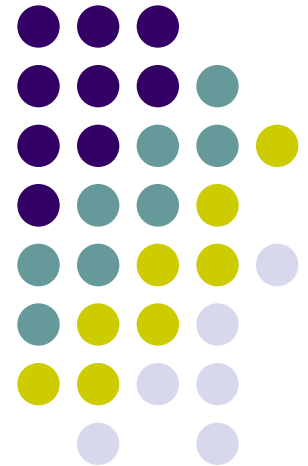


Ρευστομηχανική

Μετρήσεις στη Μηχανική Ρευστών

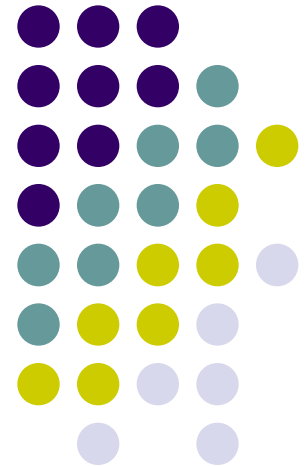
Μεταφορά ρευστών – αντλίες

Μη Νευτώνεια ρευστά

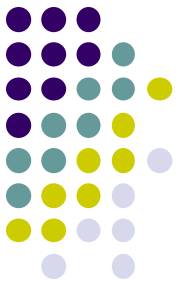


Ρευστομηχανική

Μετρήσεις στη Μηχανική Ρευστών

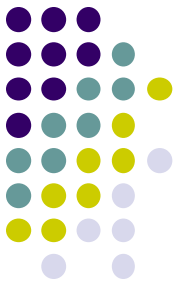


Μετρήσεις στη Μηχανική Ρευστών

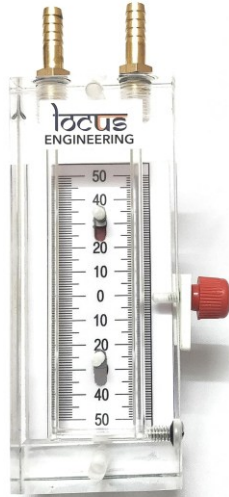
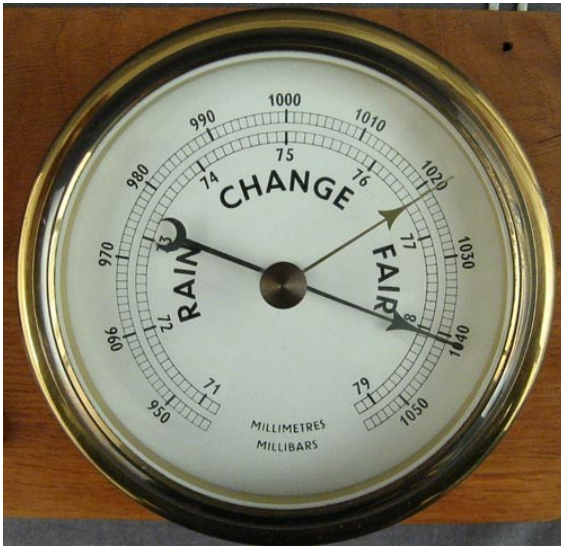
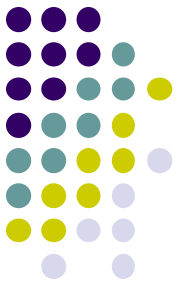


- Οι τεχνικές μετρήσεων είναι σημαντικές, διότι η Μηχανική Ρευστών βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε πειράματα.
- Οι τεχνικές μετρήσεων επικεντρώνονται κυρίως στη μέτρηση της ταχύτητας και πίεσης και στη μέτρηση της παροχής
- Η μέτρηση της παροχής διακρίνεται σε:
 - **Άμεση** μέτρηση παροχής : μέτρηση όγκου / μάζας ρευστού σε ορισμένο χρόνο (π.χ. κουβάς)
 - **Έμμεση** μέτρηση παροχής : μέτρηση κατανομής ταχύτητας → υπολογισμός παροχής (π.χ. ρέματα)

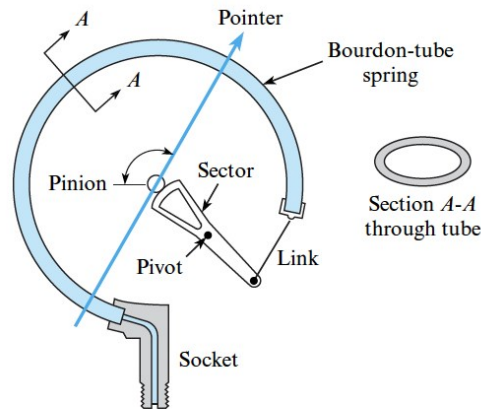
Πειράματα στη Μηχανική Ρευστών



Μετρητές πίεσης



(a)

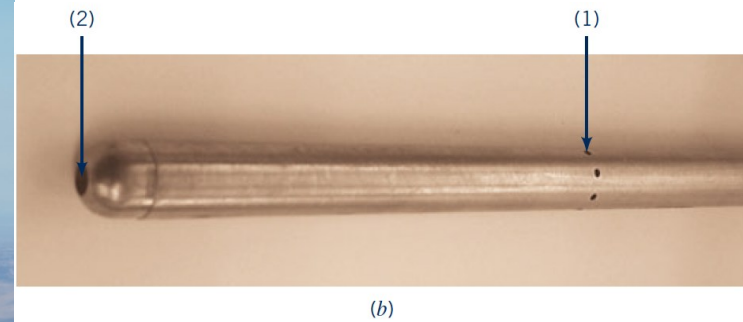
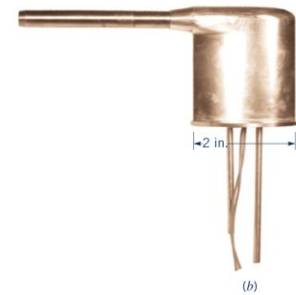
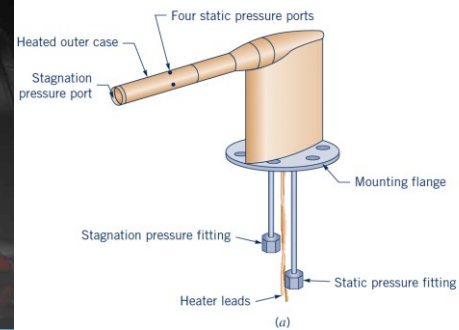
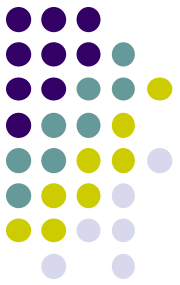


(b)

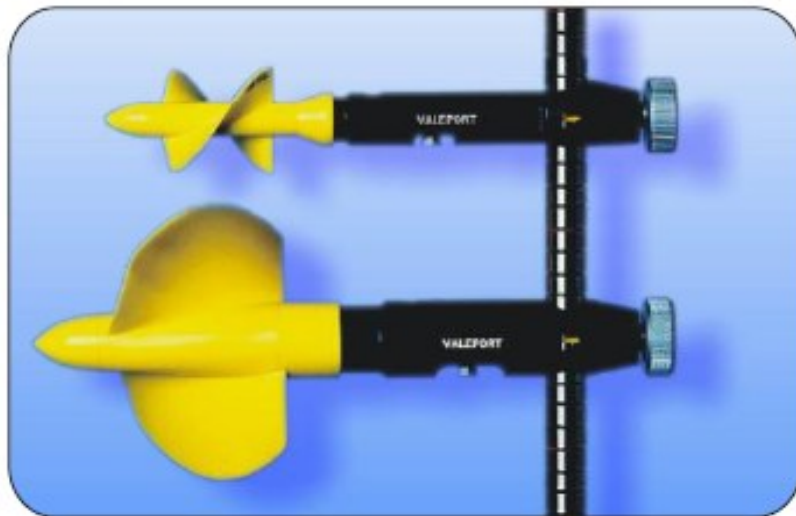
FIGURE 3.14

Bourdon-tube gage. (a) View of a typical gage (photo by Donald Elger). (b) Internal mechanism (schematic).

Μετρητές ταχύτητας



Μετρητές παροχής



The Model 001 & Model 002 Flow Meters represent a standard in open channel flow measurement. First introduced under the “Braystoke” brand over 30 years ago, both meters use the simple premise of converting speed of rotation of the helical impeller into speed of water. Available as a wading set for hand held use in shallow water, or as a hand-suspension system for use from bridges or boats, the Models 001 & 002 offer a quick, cost-effective method of measuring flow in a variety of open channel applications.

Specifications

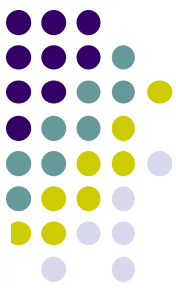
Model 001

Type: 8011 series High Impact Styrene Impeller
Size: 125mm diameter by 270mm pitch
Range: 0.03 to 10m/s
Accuracy: $\pm 1.5\%$ of reading above 0.15m/s
 $\pm 0.004\text{m/s}$ below 0.15m/s

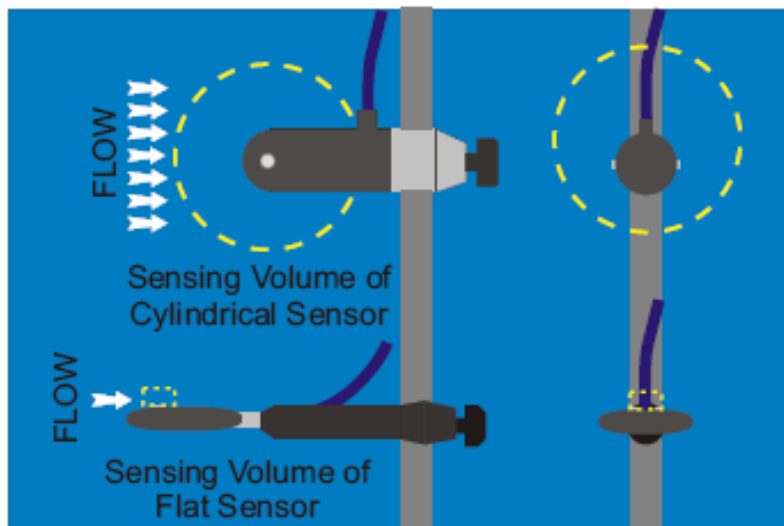
Model 002

Type: 1178 series High Impact Styrene Impeller
Size: 50mm diameter by 100mm pitch
Range: 0.046 to 5m/s
Accuracy: $\pm 2.5\%$ of reading above 0.5m/s
 $\pm 0.01\text{m/s}$ below 0.5m/s

Μετρητές παροχής



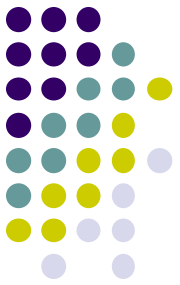
The Model 801 Electromagnetic Flow Meters measure the speed of water in Open Channel environments with exceptional accuracy. Two sensor types are available, to suit different application requirements, but both offer excellent durability, reliable accurate data, and are suitable for use in clean water and dirty or difficult environments.



What's the Difference?

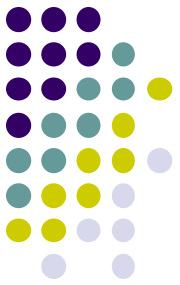
The smaller sampling volume of the flat sensor makes it very much more suitable for shallow flows, or measurements in confined spaces. However, it is also very much more sensitive to turbulent flows, which may manifest as apparently noisy real time readings. This effect can be minimised by using a long (>30secs) average period. The larger sampling volume of the cylindrical sensor effectively eliminates the turbulence noise, but also means that a greater depth of water is required for measurements.

Μετρητές πίεσης



- Μια κλασσική τεχνική μέτρησης πίεσης περιλαμβάνει τη χρήση στηλών υγρού σε κατακόρυφους ή κεκλιμένους σωλήνες.
- Οι μετρητές πίεσης που βασίζονται σε αυτή τη τεχνική ονομάζονται μανόμετρα.
- Διάφοροι τύποι μανομέτρων:
 - Υδραργυρικό βαρόμετρο (τυπικό παράδειγμα μανομέτρου)
 - Πιεζομετρικός σωλήνας
 - Μανόμετρο σχήματος U
 - Κεκλιμένο μανόμετρο

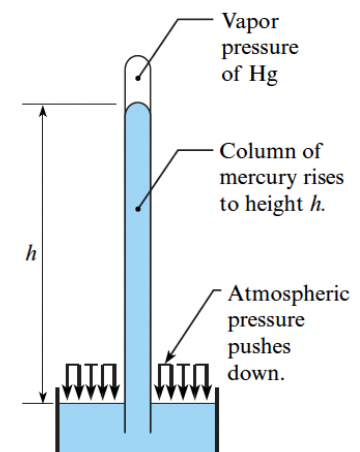
Υδραργυρικό Μανόμετρο



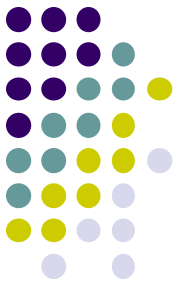
- Πρόκειται για ένα όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ατμοσφαιρικής πίεσης.
- Η πίεση στη κορυφή του βαρομέτρου ισούται με τη τάση ατμών του υδράργυρου p_v , η οποία είναι πολύ μικρή.
- Μετρώντας το h , μπορεί να προσδιοριστεί η τοπική ατμοσφαιρική πίεσης, με τη χρήση της υδροστατικής εξίσωσης πίεσης:

$$p_{\text{atm}} = \gamma_{\text{Hg}} h + p_v \approx \gamma_{\text{Hg}} h$$

A mercury barometer.

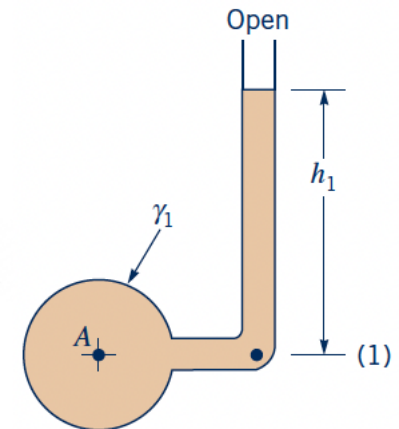


Πιεζομετρικός σωλήνας

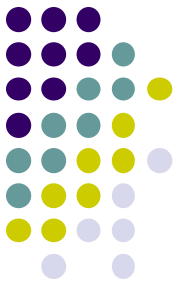


- Ο απλούστερος τύπος μανομέτρου αποτελείται από έναν κατακόρυφο σωλήνα ανοικτό στην κορυφή, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με το δοχείο στο οποίο θέλουμε να μετρήσουμε την πίεση.
- Η πίεση μπορεί να υπολογιστεί τη χρήση της υδροστατικής εξίσωσης πίεσης: $p = \gamma h + p_0$
- Απλό και ακριβές όργανο με μερικά μειονεκτήματα:
 - Μόνο όταν η πίεση είναι μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική
 - Κατάλληλο μόνο για μικρές πιέσεις
 - Κατάλληλο μόνο για υγρά

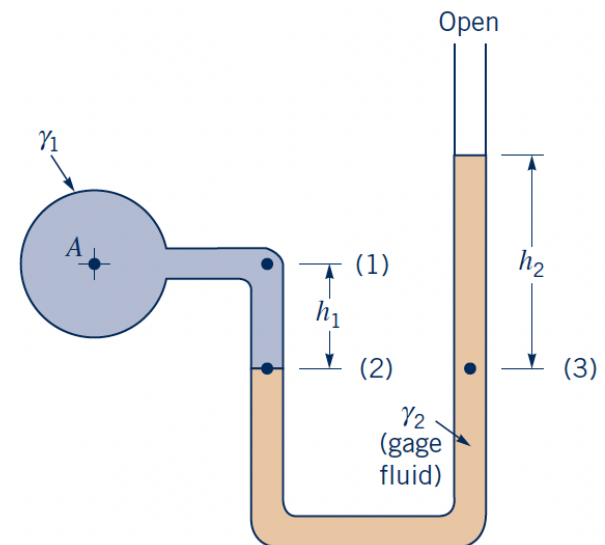
$$p_A = \gamma_1 h_1$$
$$p_A = p_1$$



Μανόμετρο σχήματος U



- Το μανόμετρο σχήματος U μετρά την πίεση μέσω της διαφοράς ύψους δύο στηλών ρευστού σε υδροστατική ισορροπία.
- Το ρευστό μέσα στο μανόμετρο ονομάζεται μανομετρικό ρευστό.
- Η πίεση μπορεί να υπολογιστεί τη χρήση της υδροστατικής εξίσωσης πίεσης: $p_A = \gamma_2 h_2 - \gamma_1 h_1$
- Αν το A περιέχει αέριο τότε: $p_A = \gamma_2 h_2$



Μανόμετρο σχήματος U

EXAMPLE 3.4

Pressure Measurement (U-Tube Manometer)

Problem Statement

Water at 10°C is the fluid in the pipe of Fig. 3.16, and mercury is the manometer fluid. If the deflection Δh is 60 cm and ℓ is 180 cm, what is the gage pressure at the center of the pipe?

Define the Situation

Pressure in a pipe is being measured using a U-tube manometer.

Properties:

- Water (10°C), Table A.5: $\gamma = 9810 \text{ N/m}^3$
- Mercury, Table A.4: $\gamma = 133,000 \text{ N/m}^3$

State the Goal

Calculate gage pressure (kPa) in the center of the pipe.

Generate Ideas and Make a Plan

Start at point 1 and work to point 4 using ideas from Eq. (3.10c). When fluid depth increases, add a pressure change. When fluid depth decreases, subtract a pressure change.

Take Action (Execute the Plan)

1. Calculate the pressure at point 2 using the hydrostatic equation (3.10c):

$$\begin{aligned} p_2 &= p_1 + \text{pressure increase between 1 and 2} = 0 + \gamma_m \Delta h_{12} \\ &= \gamma_m (0.6 \text{ m}) = (133,000 \text{ N/m}^3)(0.6 \text{ m}) \\ &= 79.8 \text{ kPa} \end{aligned}$$

2. Find the pressure at point 3:

- The hydrostatic equation with $z_3 = z_2$ gives

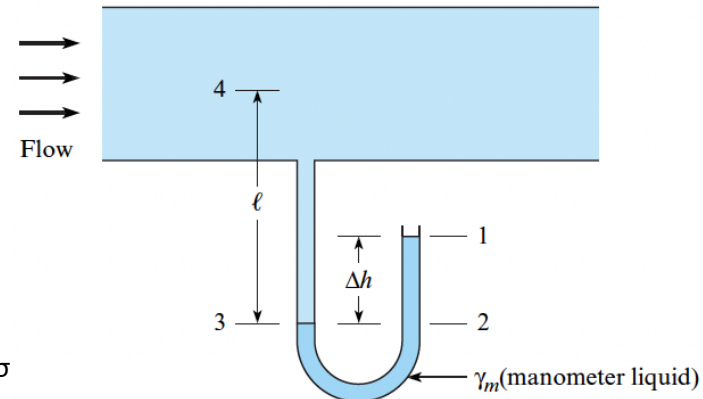
$$p_3|_{\text{water}} = p_2|_{\text{water}} = 79.8 \text{ kPa}$$

- When a fluid-fluid interface is flat, pressure is constant across the interface. Thus, at the oil–water interface

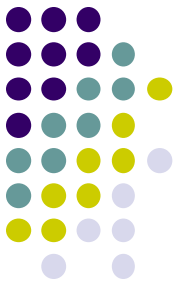
$$p_3|_{\text{mercury}} = p_3|_{\text{water}} = 79.8 \text{ kPa}$$

3. Find the pressure at point 4 using the hydrostatic equation given in Eq. (3.10c):

$$\begin{aligned} p_4 &= p_3 - \text{pressure decrease between 3 and 4} = p_3 - \gamma_w \ell \\ &= 79,800 \text{ Pa} - (9810 \text{ N/m}^3)(1.8 \text{ m}) \\ &= 62.1 \text{ kPa gage} \end{aligned}$$



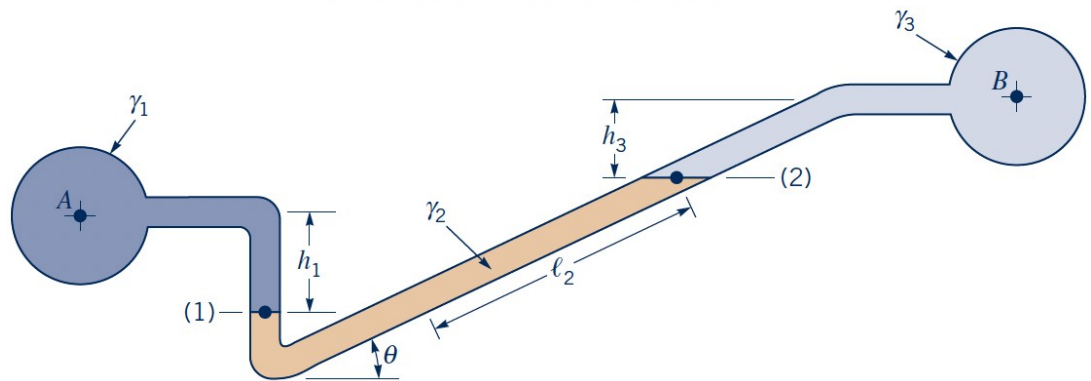
Κεκλιμένο μανόμετρο



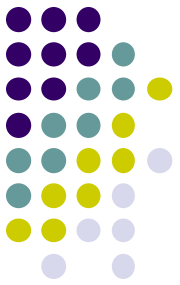
- Για την ακριβή μέτρηση πολύ μικρών διαφορών πίεσης με μεγάλη ακρίβεια χρησιμοποιούνται τα κεκλιμένα μανόμετρα.
- Η διαφορά πίεσης μπορεί να υπολογιστεί τη χρήση της εξίσωσης:

$$p_A - p_B = \gamma_2 \ell_2 \sin \theta + \gamma_3 h_3 - \gamma_1 h_1$$

- Το κεκλιμένο μανόμετρο συχνά χρησιμοποιείται για αέρια, όπου η παραπάνω εξίσωση απλοποιείται σε: $p_A - p_B = \gamma_2 \ell_2 \sin \theta$

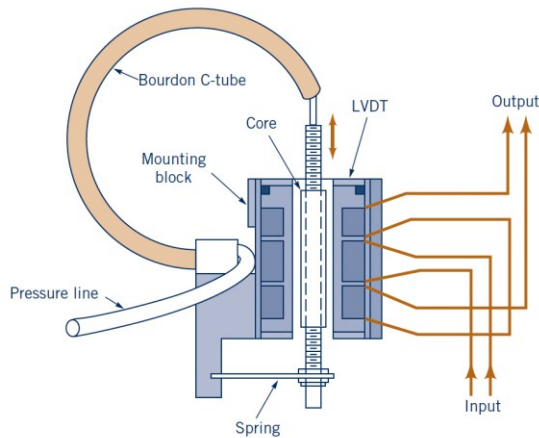
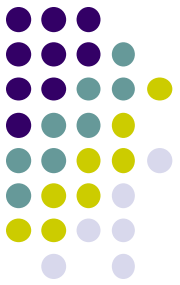


Μηχανικά και Ηλεκτρονικά Όργανα Μέτρησης Πίεσης

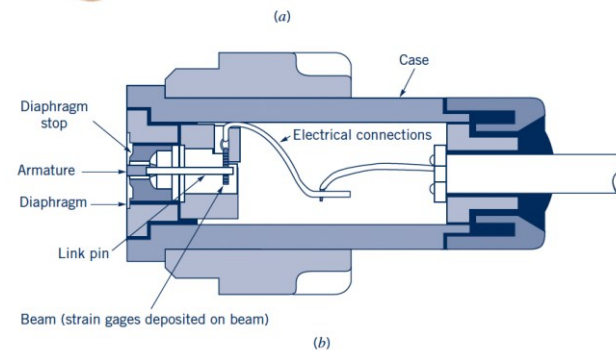


- Τα μανόμετρα είναι αργά και ακατάλληλα για πολύ υψηλές ή ταχέως μεταβαλλόμενες πιέσεις.
- Τα μηχανικά όργανα, π.χ. μανόμετρο Bourdon, βασίζονται στην ελαστική παραμόρφωση και μετρούν τη σχετική πίεση.
- Τα ανεροειδή βαρόμετρα μετρούν απόλυτη ατμοσφαιρική πίεση.
- Οι μετατροπείς πίεσης (pressure transducers) παρέχουν ηλεκτρικό σήμα για συνεχή και δυναμική μέτρηση.
- Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες καλύπτουν μεγάλο εύρος πιέσεων και συχνοτήτων.

Μηχανικά και Ηλεκτρονικά Όργανα Μέτρησης Πίεσης

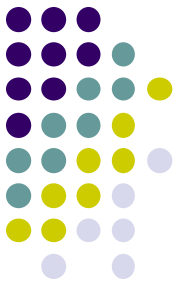


■ **Figure 2.14** Pressure transducer that combines a linear variable differential transformer (LVDT) with a Bourdon gage. (From Ref. 4, used by permission.)



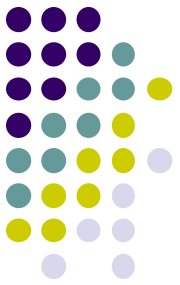
■ **Figure 2.15** (a) Photograph of a typical pressure transducer with a male thread fitting in front of the diaphragm for system connection and an electrical connector in the rear of the device. (b) Schematic diagram of a typical pressure transducer device (male thread connector not shown). Deflection of the diaphragm due to pressure is measured with a silicon beam on which strain gages and an associated bridge circuit have been deposited.

Μετρητές ταχύτητας



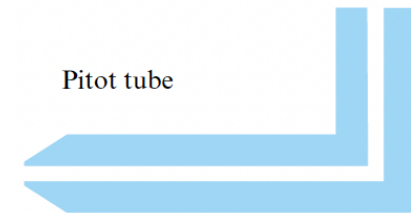
- Η ταχύτητα της ροής μπορεί να μετρηθεί άμεσα ή έμμεσα με όργανα που βασίζονται στην πίεση, στην περιστροφή, στη θερμική μεταφορά ή σε οπτικά φαινόμενα.
- Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από το είδος της ροής, την απαιτούμενη ακρίβεια και τη χρονική μεταβολή της ταχύτητας.
- Διάφοροι μετρητές ταχύτητας:
 - Σωλήνες pitot (βασισμένοι στη πίεση)
 - Όργανα διεύθυνσης και συνιστωσών ταχύτητας (Yaw meters)
 - Ανεμόμετρα (Μηχανικά και Θερμικά)
 - Οπτικά όργανα (Ανεμόμετρο Laser-Doppler)

Σωλήνες pitot

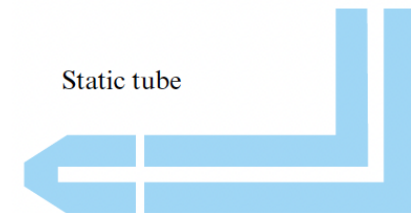


- Υπάρχουν τρία είδη σωλήνων pitot:
 - Σωλήνας κρούσης (stagnation – pitot - tube): Μετρά την κρουστική πίεση ευθυγραμμισμένος με τη ροή. Η ακρίβεια του επηρεάζεται από τα ιξώδη φαινόμενα σε χαμηλούς αριθμούς Re .
 - Στατικός σωλήνας (static tube): Μετρά τη στατική πίεση μέσω πλευρικών οπών χωρίς να διαταράσσει τη ροή.
 - Σωλήνας στατικός-Pitot: Μετρά ταυτόχρονα ολική και στατική πίεση για τον υπολογισμό της ταχύτητας.

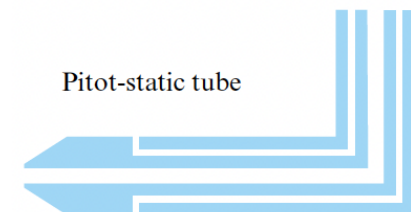
Section views of (a) Pitot tube, (b) Static tube, and (c) Pitot-static tube.



(a)

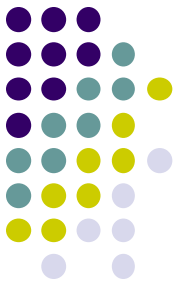


(b)

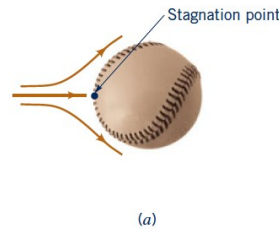


(c)

Σωλήνες pitot-static



- Υπάρχει ένα σημείο κρούσης (Stagnation point) σε κάθε ακίνητο σώμα που τοποθετείται σε ρέον ρευστό.

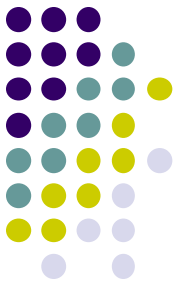


- Εξίσωση Bernoulli $p + \frac{1}{2}\rho V^2 + \gamma z = p_T = \text{constant along a streamline}$

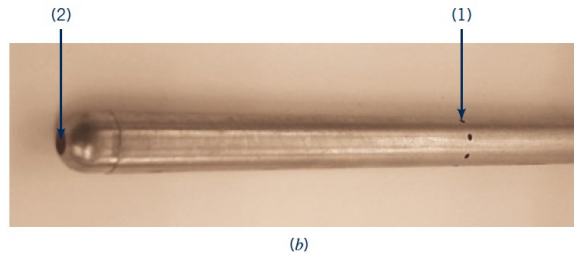
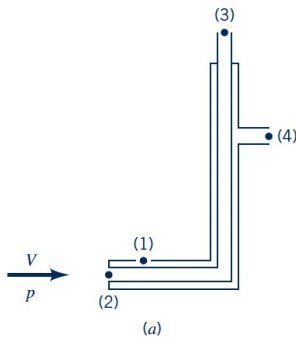
Κρουστική
πίεση

Ολική
πίεση

Σωλήνες pitot-static



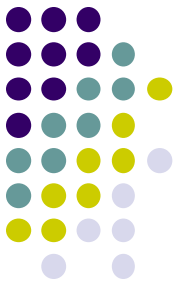
- Η γνώση των τιμών της στατικής και της κρουστικής πίεσης σε ένα ρευστό επιτρέπει τον υπολογισμό της ταχύτητας του ρευστού.
- Αυτή είναι η αρχή λειτουργίας του σωλήνα Pitot–στατικού.
- Δύο ομόκεντροι σωλήνες συνδέονται σε δύο όργανα μέτρησης πίεσης (ή σε ένα διαφορικό όργανο), ώστε να είναι δυνατός ο προσδιορισμός των τιμών της στατικής και της κρουστικής πίεσης (ή της διαφοράς τους).



$$\begin{aligned}p_4 &= p_1 = p \\p_3 &= p + \frac{1}{2}\rho V^2 \\p_3 - p_4 &= \frac{1}{2}\rho V^2\end{aligned}$$

$$V = \sqrt{2(p_3 - p_4)/\rho}$$

Σωλήνες pitot-static



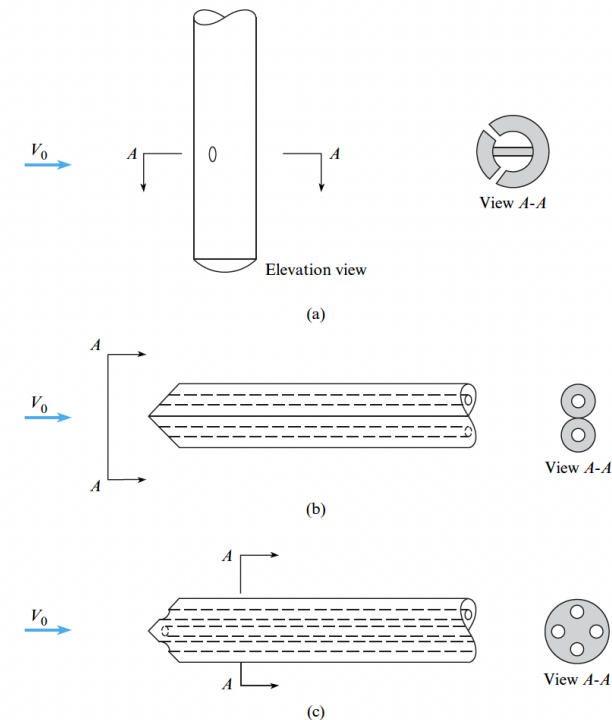
- Οι οπές μέτρησης πρέπει να είναι απολύτως λείες και χωρίς ατέλειες.
- Η θέση των οπών στατικής πίεσης πρέπει να είναι σωστά επιλεγμένη.
- Ο σωλήνας πρέπει να ευθυγραμμίζεται όσο το δυνατόν καλύτερα με τη διεύθυνση της ροής, παράλληλος ($\pm 5^\circ$) στη ροή.
- Για μεγάλες ταχύτητες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα συμπίεστικότητας.
- Σε ροές με άγνωστη διεύθυνση μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατευθυντικός Pitot.

Μετρητές yaw

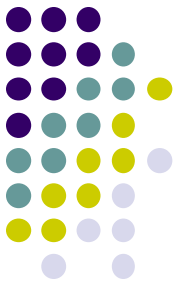
- Μετρά διεύθυνση και μέτρο ταχύτητας μέσω πολλαπλών πιέσεων.
- Περιστρέφεται μέχρι να μηδενιστεί η διαφορική πίεση.
- Κατάλληλο για 2D ή 3D ροές ανάλογα με τον τύπο.
- Η ταχύτητα υπολογίζεται από ειδικές σχέσεις.

FIGURE 13.5

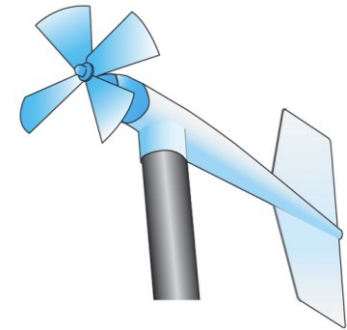
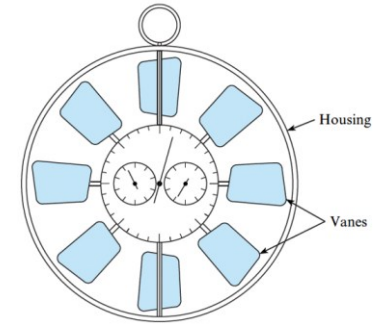
Various types of yaw meters:
(a) cylindrical-tube yaw meter,
(b) two-tube yaw meter,
(c) three-dimensional yaw meter.



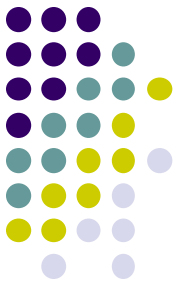
Μηχανικά Ανεμόμετρα



- Τα ανεμόμετρα πτερυγίων και έλικας μετρούν την ταχύτητα μέσω της περιστροφής πτερυγίων που κινούνται από τη ροή.
- Η ταχύτητα υπολογίζεται από τη συχνότητα περιστροφής του ρότορα μέσω ηλεκτρονικού κυκλώματος ή μηχανικού δείκτη.
- Το ανεμόμετρο κυπέλλων μετρά την ταχύτητα από τη δύναμη οπισθέλκουσας που ασκείται σε κυπελλοειδή στοιχεία.
- Τα ανεμόμετρα χρησιμοποιούνται όχι μόνο στον αέρα αλλά και σε υγρά, όπως σε ποτάμια και ρεύματα.

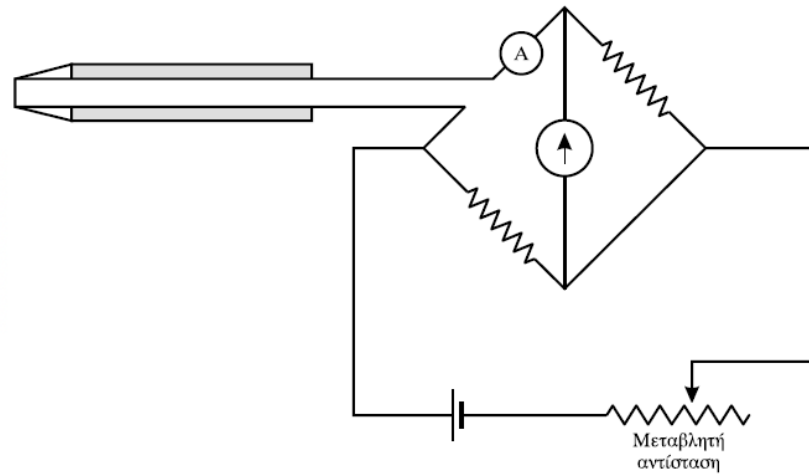
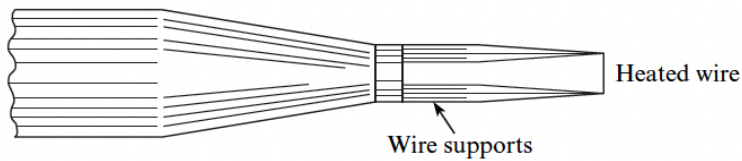
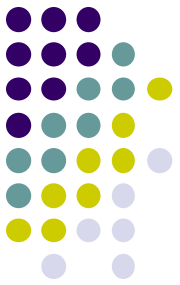


Ανεμόμετρα θερμικής αντιστάσεως



- Μετρούν την ταχύτητα μέσω της ψύξης ενός θερμαινόμενου αισθητήρα από τη ροή λόγω μεταφοράς θερμότητας.
- Η ηλεκτρική ισχύς ή το ρεύμα που απαιτείται για να διατηρηθεί η θερμοκρασία του αισθητήρα συσχετίζεται με την ταχύτητα της ροής.
- Έχουν πολύ υψηλή χρονική απόκριση και είναι κατάλληλα για μέτρηση ταλαντώσεων σε τυρβώδη ροή.
- Το πολύ μικρό μέγεθος του αισθητήρα επιτρέπει μετρήσεις σε περιοχές όπως το οριακό στρώμα.
- Ο αισθητήρας είναι συνήθως σύρμα μήκους 1–2 mm και διαμέτρου μικρότερης από 10 μm , θερμαινόμενο περίπου στους 150°C.

Ανεμόμετρα θερμικής αντιστάσεως



Ρυθμός μεταβολής της αντίστασης του σύρματος $\approx$

Ρυθμό απώλειας θερμότητας του σύρματος $\approx$

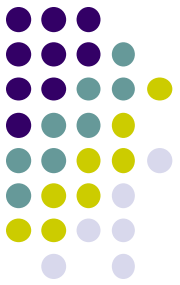
Ρυθμό ροής μάζας του ρευστού

$$u = \frac{I^4 R^2}{\rho a^2} - \frac{b}{\rho}$$

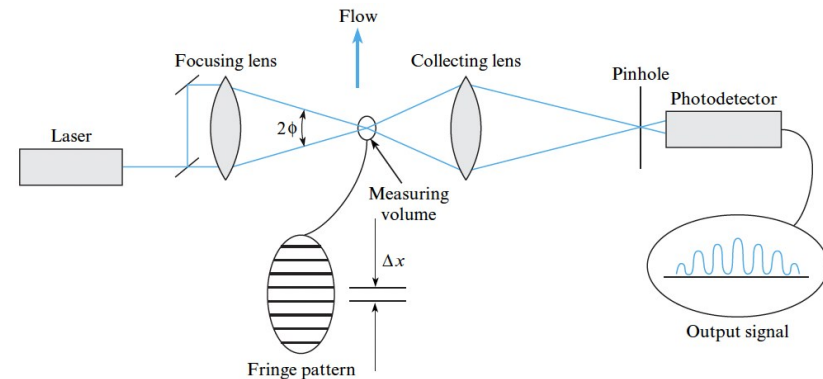
a,b: σταθερές ανεμομομέτρου

Επειδή $u \approx I^4$, ακριβής μέτρηση του I οδηγεί σε πολύ μεγάλη ακρίβεια στη μέτρηση του u (μικρές ταχύτητες)

Ανεμόμετρο Laser-Doppler

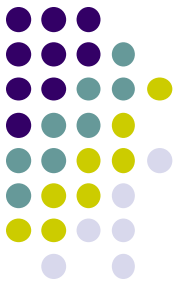


- Μετρά την ταχύτητα μέσω της μετατόπισης Doppler του φωτός που σκεδάζεται από σωματίδια της ροής.
- Δεν διαταράσσει τη ροή και προσφέρει πολύ υψηλή χωρική ανάλυση σε έναν πολύ μικρό όγκο μέτρησης.
- Απαιτεί διαφανές ρευστό και κατάλληλα σωματίδια ιχνηθέτη που κινούνται μαζί με το ρευστό.
- Μπορεί να μετρήσει μία, δύο ή τρεις συνιστώσες ταχύτητας χρησιμοποιώντας δέσμες laser διαφορετικού μήκους κύματος.



Gooseneck Digital Anemometer DT-318

(75 €)



This CEM Digital anemometer features a 16" gooseneck detector allowing you to take measurements at hard to reach areas.

- 16" gooseneck detector for easy to measure hard-to-reach areas.
- High sensitive and accurate
- Easy-to-use design
- 3 1/2 digits LCD display
- Low power consumption
- Data Hold and MAX Hold function
- Low battery indication
- Complete with gift box with carry case, battery
- Dimensions/Wt.: 163X 45 X 34mm/210g



Hot Wire Anemometer - Tecpel AVM714

(330 €)

Ideally suited for environmental testing, air conveyors, flow hoods, clean rooms, air velocity, air balancing, fans/motors/blowers/furnace velocity and refrigerated cases.

The combination of hot wire and standard thermistor, deliver rapid and precise measurements even at low air velocity value, whilst the microprocessor circuit assures maximum possible accuracy and provides special functions and features.

Specifications:

Measurement : m/s (meter per second), km/h (kilometers per hour), ft/min (feet/per minute), knots(nautical miles per hour), mile/h (miles per hour), Temp. deg C and deg F.

Sampling Time : Approx. 0.8 sec.

Power off: Auto power off to save battery life or manual off by push button.

Operating Temperature: 0 to to 50 deg C (32 deg F to 122 deg F)

Operating Humidity: Less than 80% RH

Power Supply : 1.5V AAA (UM-4) battery x 6 (Alkaline or heavy duty type)

Weight: 355 g/0.78 lbs

Dimension Main Instrument: 180 x 72 x 32 mm (7.1 x 2.8 x 1.3 inch)

Telescope Probe: Round 12 mm Diameter x 280 mm (min Length) x 940 mm (Max length)

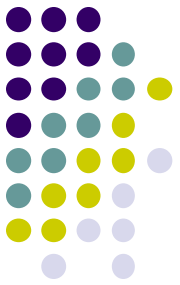
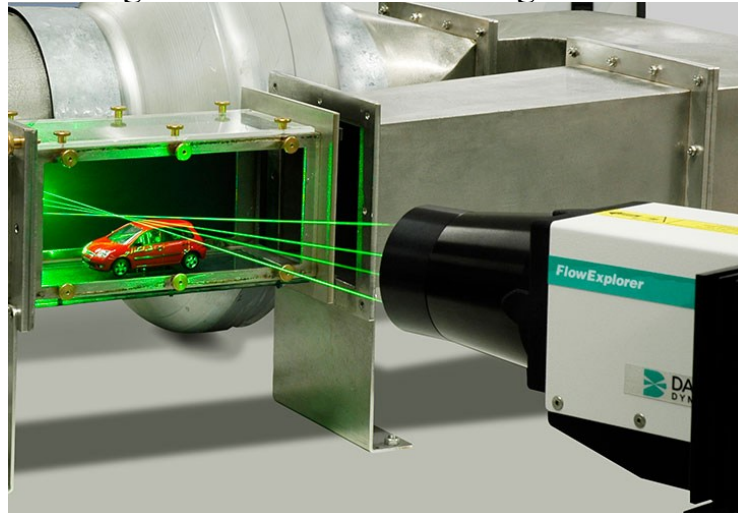


DANTE DYNAMICS LDA (200000 €)

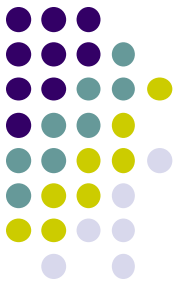
Laser Doppler Anemometry (LDA), also known as Laser Doppler Velocimetry (LDV), is an optical technique ideal for non-intrusive 1D, 2D, and 3D point measurement of velocity and turbulence distribution in both free flows and internal flows.

Laser Doppler Velocimeters have several strong features:

- Non-intrusive
- Measure velocity components directly
- Good spatial resolution (down to <1 mm)
- Good temporal resolution (up to >1 kHz)
- Wide velocity range (0 to hypersonic)
- Measure the sign of the velocity in reversing flows.
- Linear response to velocity
- Calibration given by the laser wavelength and the intersection angle between the beams.

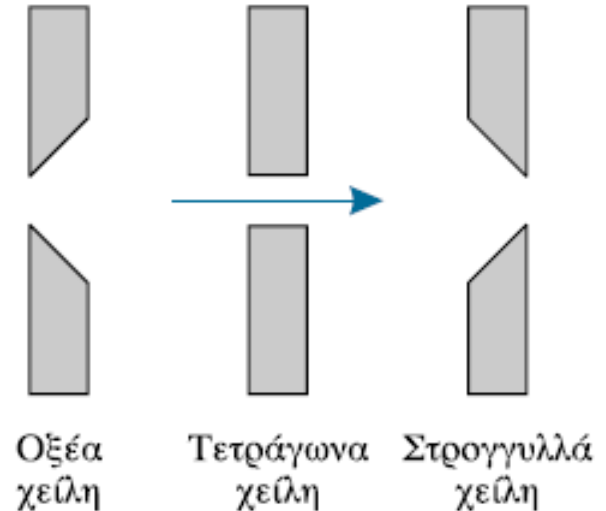
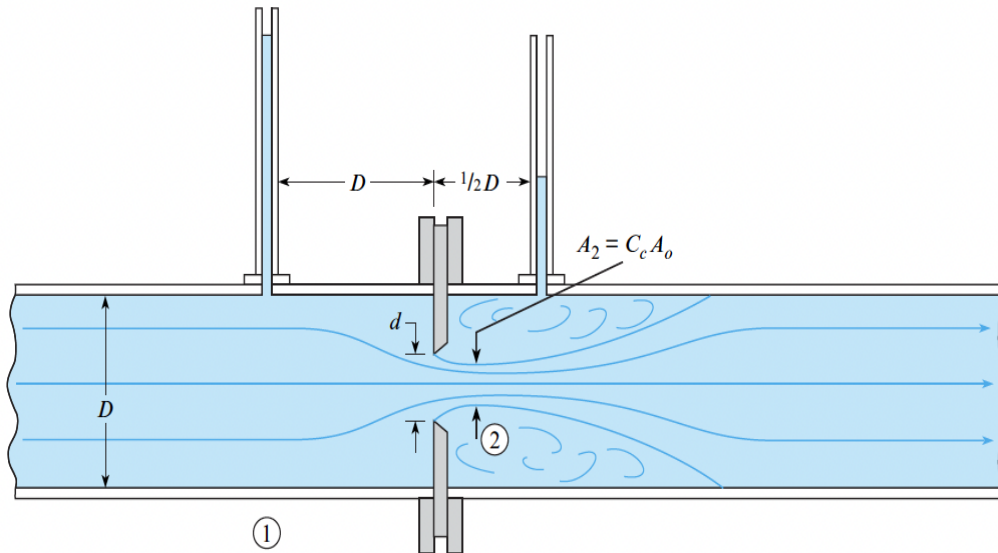


Μετρητές παροχής



- Η παροχή ενός ρευστού μπορεί να μετρηθεί είτε έμμεσα μέσω της πτώσης πίεσης που προκαλείται από μία κατάλληλη γεωμετρική διάταξη, είτε άμεσα μέσω της κίνησης δινών ή ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων.
- Η επιλογή του κατάλληλου μετρητή παροχής εξαρτάται από το είδος του ρευστού, το εύρος παροχής, την ακρίβεια, την επιτρεπτή απώλεια φορτίου και τις συνθήκες λειτουργίας.
- Διάφοροι μετρητές παροχής:
 - Διαφορικής πίεσης: Στομίου, Venturi, Nozzle
 - Μη παρεμβατικοί: Ηλεκτρομαγνητικός, Υπερηχητικός
 - Μηχανικοί: Turbine, Rotameter
 - Δινών: Vortex flowmeter
 - Ανοικτής ροής: Ορθογωνικός και Τριγωνικός υπερχειλιστής

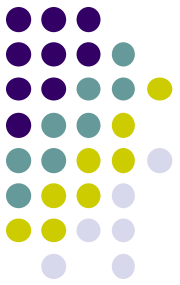
Μετρητές στομίου



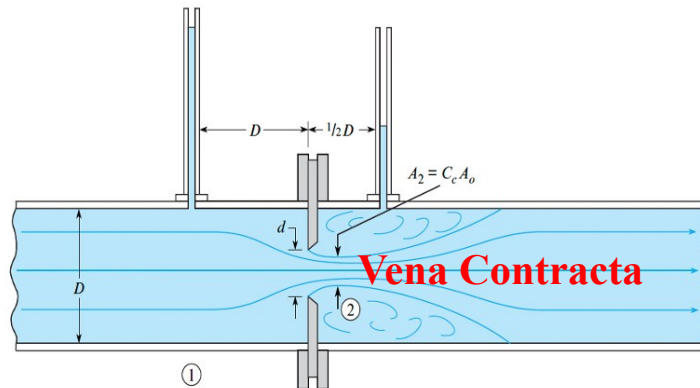
Σχήμα. Μετρητές στομίου (αριστερά) και γεωμετρία οπών (δεξιά).

Λόγω παρεμβολής στένωσης → αύξηση κινητικής ενέργειας και μείωση της ενέργειας ροής (πίεσης) → εμφάνιση διαφοράς πίεσης (μετρήσιμη)

Μετρητές στομίου



- Μετρούν την παροχή μέσω της πτώσης πίεσης που δημιουργείται από μία λεπτή πλάκα με κυκλική οπή τοποθετημένη μέσα στον αγωγό.
- Η ελάχιστη διατομή της ροής (A_2) εμφανίζεται λίγο κατάντη της οπής και ονομάζεται vena contracta.



$$Q = KA_o \sqrt{2g\Delta h}$$

$$K = \frac{C_d}{\sqrt{1 - C_c^2 A_o^2 / A_1^2}}$$

$$C_c = (d_2/d)^2.$$

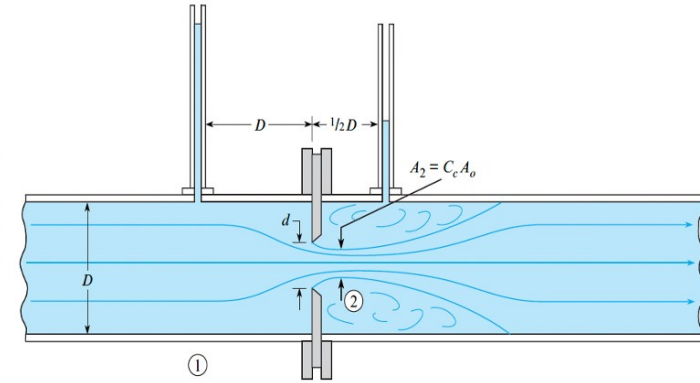
- Ο συντελεστής συστολής C_c συσχετίζει το εμβαδόν της vena contracta με το εμβαδόν της οπής και εξαρτάται από τη γεωμετρία και τον αριθμό Reynolds.
- Ο συντελεστής ροής K εξαρτάται από τον λόγο διαμέτρων d/D και τον αριθμό Reynolds και λαμβάνεται από πειραματικά διαγράμματα ή πρότυπα.
- Οι μετρητές στομίου είναι απλοί και οικονομικοί, αλλά προκαλούν σχετικά μεγάλη απώλεια φορτίου σε σχέση με μετρητές τύπου Venturi.

Μετρητές στομίου



- Αρχή διατήρησης της ενέργειας στις θέσεις 1 και 2 (Vena Contracta)

$$\left. \begin{aligned} \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 &= \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \\ V_1 A_1 &= V_2 A_2 \\ C_c &= (d_2/d)^2 \end{aligned} \right\} V_2 = \sqrt{\frac{2g(h_1 - h_2)}{1 - C_c^2 A_o^2/A_1^2}}$$



Στόχος είναι να εκφραστεί η παροχή συναρτήσει των h_1 , h_2 και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του στομίου: $A_2 = C_c A_o$

$$Q = \frac{C_v C_c A_o}{\sqrt{1 - C_c^2 A_o^2/A_1^2}} \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$$

$$C_v C_c = C_d$$

$$K = \frac{C_d}{\sqrt{1 - C_c^2 A_o^2/A_1^2}} \left[\text{Συντελεστής ροής} \right]$$

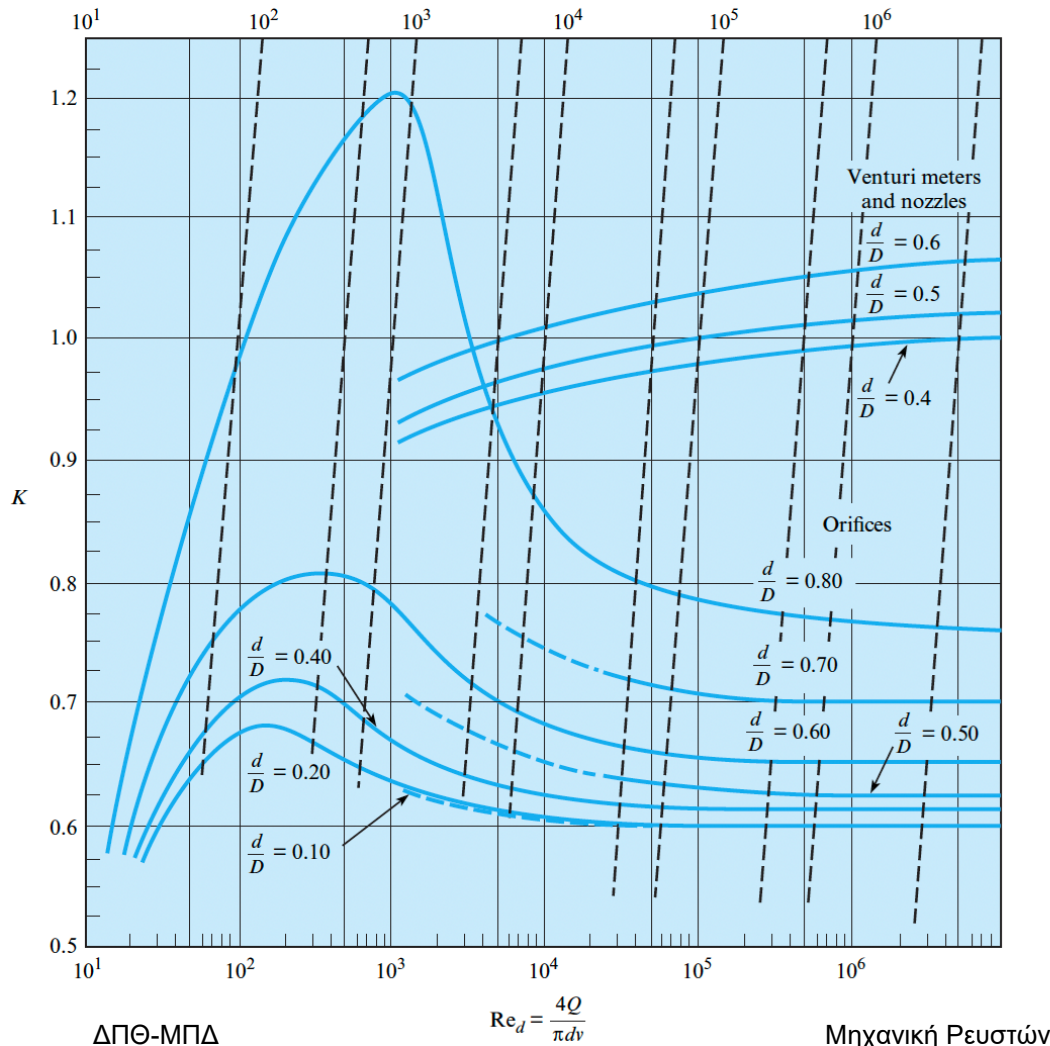
Σχέση ογκομετρικής παροχής και διαφορικής πίεσης

$$Q = K A_o \sqrt{2g \Delta h}$$

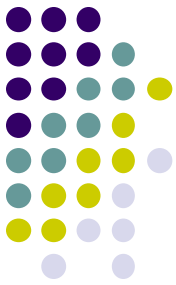
Παρέχεται ως συνάρτηση του αριθμού Reynolds

Μετρητές στομίου

$$\frac{Re_d}{K} = \frac{d}{v} \sqrt{2g\Delta h} = \frac{d}{v} \sqrt{\frac{2\Delta p_z}{\rho}}$$



Συντελεστής ροής K



EXAMPLE 13.3

Applying an Orifice Meter to Measure the Flow Rate of Water

Problem Statement

A 15 cm orifice is located in a horizontal 24 cm water pipe, and a water-mercury manometer is connected to either side of the orifice. When the deflection on the manometer is 25 cm, what is the discharge in the system, and what head loss is produced by the orifice? Assume the water temperature is 20°C.

Define the Situation

Water flows through an orifice ($d = 0.15$ m) in a pipe ($D = 0.24$ m). A mercury-water manometer is used to measure pressure drop.

Properties:

- Water (20°C): Table A.5, $\nu = 1 \times 10^{-6}$ m²/s.
- Mercury (20°C): Table A.4, SG = 13.6.

- Find discharge Q using Eq. (13.7a).
- Calculate the coefficient of contraction C_c using Eq. (13.6).
- Solve for the velocity V_2 at the vena contracta.
- Calculate head loss using Eq. (13.8).

Take Action (Execute the Plan)

1. Change in piezometric head:

- Apply manometer equation from 1 to 2:

$$p_1 + \gamma_w(l + \Delta l) - \gamma_{Hg}\Delta l - \gamma_w l = p_2$$

- Solve for Δh :

$$\Delta h = \frac{p_1 - p_2}{\gamma_w} = \Delta l \frac{\gamma_{Hg} - \gamma_w}{\gamma_w} = \Delta l \left(\frac{\gamma_{Hg}}{\gamma_w} - 1 \right)$$

$$\Delta h = (0.25 \text{ m})(13.6 - 1) = 3.15 \text{ m of water}$$

2. Flow coefficient:

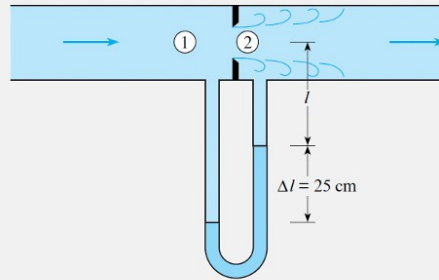
- Calculate (Re_d/K) :

$$\frac{Re_d}{K} = \frac{d \sqrt{2g\Delta h}}{\nu} = \frac{0.15 \text{ m} \sqrt{2(9.81 \text{ m/s}^2)(3.15 \text{ m})}}{1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 1.2 \times 10^6$$

- From Fig. 13.15 with $d/D = 0.625$, $K = 0.66$ (interpolated).

State the Goal

- Calculate discharge (in m³/s) in the pipe.
- Calculate head loss (in meters) produced by the orifice.



Generate Ideas and Make a Plan

- Calculate $\Delta h = h_1 - h_2$ using the manometer equation.
- Find the flow coefficient K using Fig. 13.15.

3. Discharge:

$$\begin{aligned} Q &= 0.66 A_o \sqrt{2g\Delta h} \\ &= 0.66 \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2(9.81 \text{ m/s}^2)(3.15 \text{ m})} \\ &= 0.66 (0.785)(0.15^2 \text{ m}^2)(7.86 \text{ m/s}) = \boxed{0.092 \text{ m}^3/\text{s}} \end{aligned}$$

4. Coefficient of contraction C_c :

$$K = \frac{C_d}{\sqrt{1 - C_c^2 A_o^2 / A_1^2}}$$

Let $K = 0.66$. The ratio $(A_o/A_1)^2 = (0.625)^4 = 0.1526$ and $C_d = C_v C_c$. Assuming $C_v = 0.98$ (see the discussion of C_v in §13.2.) and solving for C_c gives $C_c = 0.633$.

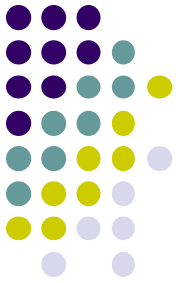
5. Velocity at the vena contracta:

$$\begin{aligned} V_2 &= Q / (C_c A_o) \\ (0.092 \text{ m}^3/\text{s}) / [(0.633)(\pi/4)(0.15^2 \text{ m}^2)] &= 8.23 \text{ m/s} \end{aligned}$$

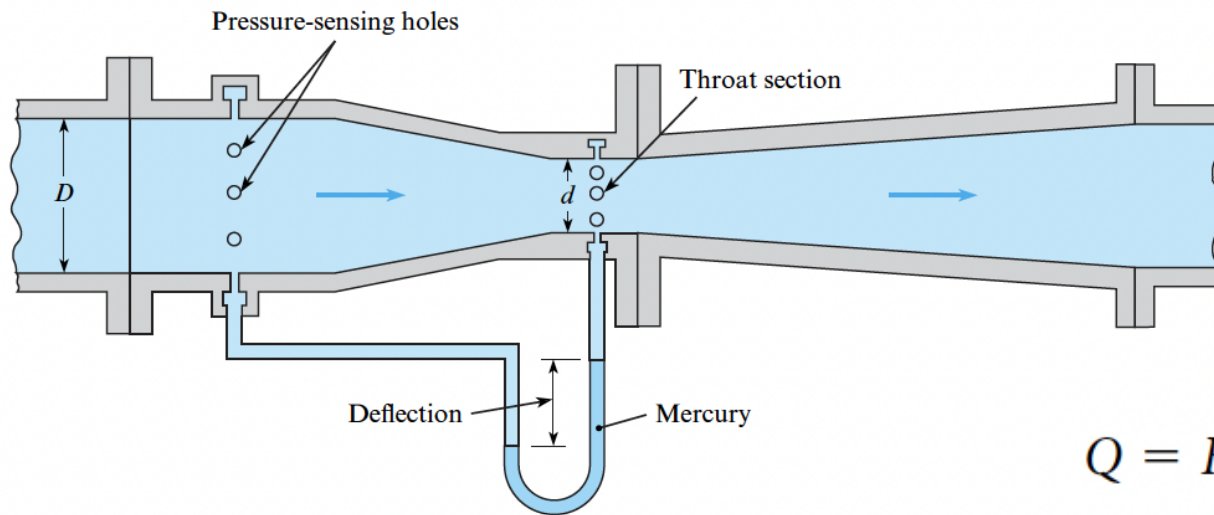
$$\begin{aligned} V_1 &= Q / A_{\text{pipe}} \\ (0.092 \text{ m}^3/\text{s}) / [(\pi/4)(0.24^2 \text{ m}^2)] &= 2.03 \text{ m/s} \end{aligned}$$

6. Head loss:

$$\begin{aligned} h_L &= (V_2 - V_1)^2 / 2g = (8.23 - 2.03)^2 / (2 \times 9.81) \\ &= \boxed{1.96 \text{ m}} \end{aligned}$$



Μετρητές venturi



$$Q = KA_t \sqrt{2g\Delta h}$$

- Μετρούν την παροχή μέσω της πτώσης πίεσης μεταξύ της εισόδου και του λαιμού ενός συγκλίνοντος–αποκλίνοντος αγωγού.
- Η ροή είναι εξομαλυμένη, οπότε οι απώλειες φορτίου είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τον μετρητή στομίου.
- Ο συντελεστής ροής K πλησιάζει τη μονάδα για μεγάλους αριθμούς Reynolds, προσφέροντας υψηλή ακρίβεια.
- Κώνος προσέγγισης $15^\circ - 20^\circ$, κώνος απομάκρυνσης $< 7^\circ$

EXAMPLE 13.6

Applying a Venturi Meter to Measure the Flow Rate of Water

Problem Statement

The pressure difference between the taps of a horizontal venturi meter carrying water is 35 kPa. If $d = 20$ cm and $D = 40$ cm, what is the discharge of water at 10°C ?

Define the Situation

- Water flows through a horizontal venturi meter.
- Pipe diameter is $D = 0.40$ m. Venturi throat diameter is $d = 0.2$ m.

Properties: Water (10°C): Table A.5, $\nu = 1.31 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, and $\gamma = 9810 \text{ N/m}^3$.

State the Goal

Find the discharge (m^3/s).

Generate Ideas and Make a Plan

1. Compute $\Delta h = h_1 - h_2$.
2. Find the flow coefficient K from Fig. 13.15.
3. Find discharge Q using Eq. (13.7a).

Take Action (Execute the Plan)

1. Change in piezometric head:

$$\Delta h = \frac{\Delta p}{\gamma} + \Delta z = \frac{\Delta p}{\gamma} + 0 = \frac{35,000 \text{ N/m}^2}{9810 \text{ N/m}^3} = 3.57 \text{ m of water}$$

2. Flow coefficient:

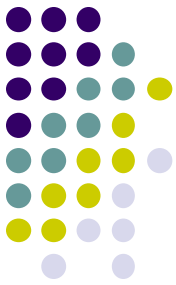
- Calculate (Re_d/K) :

$$\frac{\text{Re}_d}{K} = \frac{d\sqrt{2g\Delta h}}{\nu} = \frac{0.20 \sqrt{2(9.81)(3.57)}}{1.31(10^{-6})} = 1.28 \times 10^6$$

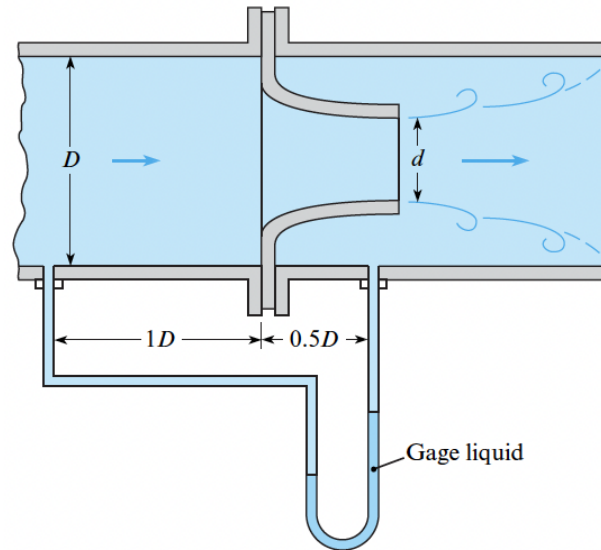
- From Fig. 13.15, find that $K = 1.02$.

3. Discharge:

$$\begin{aligned} Q &= 1.02 A_2 \sqrt{2g\Delta h} \\ &= 1.02(0.785)(0.20^2) \sqrt{2(9.81)(3.57)} = \boxed{0.268 \text{ m}^3/\text{s}} \end{aligned}$$

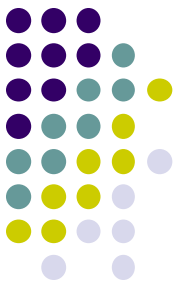


Ακροφύσια ροής

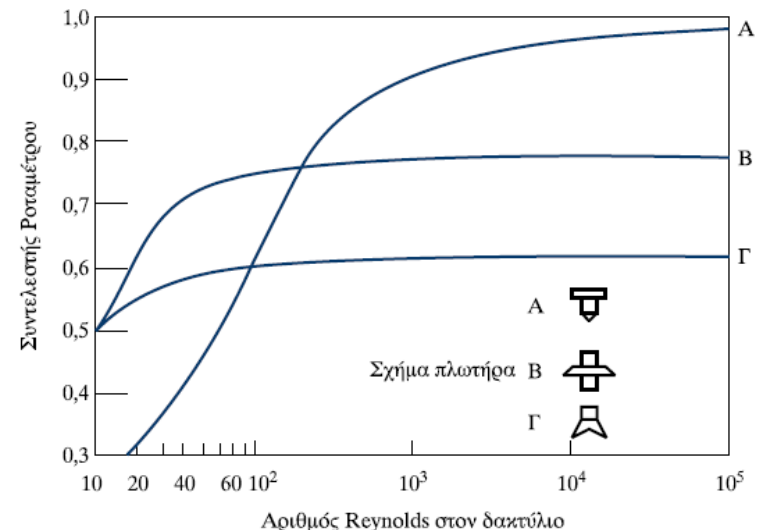
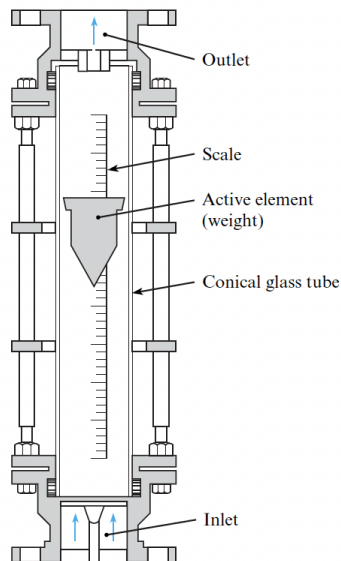


- Μετρούν την παροχή μέσω της πτώσης πίεσης σε ένα ακροφύσιο που τοποθετείται μέσα στον αγωγό.
- Είναι πιο ανθεκτικά σε ροές με σωματίδια ή διάβρωση σε σχέση με το orifice, επειδή η γεωμετρία του αλλοιώνεται λιγότερο από τη φθορά.
- Παρουσιάζουν παρόμοια απώλεια φορτίου με το orifice, αλλά με μεγαλύτερη μηχανική αντοχή.
- Χρήση για τη μέτρηση ροής ατμού

Ροτάμετρα

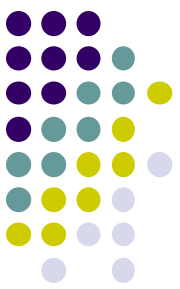


- Μετρούν την παροχή από τη θέση ενός ελεύθερου πλωτήρα μέσα σε έναν κωνικό σωλήνα, όπου η ισορροπία μεταξύ βάρους και οπισθέλκουσας καθορίζει τη στάθμη του.
- Είναι απλά, χαμηλού κόστους και εύχρηστα, αλλά έχει μικρότερη ακρίβεια από μετρητές όπως το Venturi ή του στομίου.



Σχήμα. Ροτάμετρο και Συντελεστής ροταμέτρου

Παράδειγμα 9.2



Ροτάμετρο αποτελείται από αγωγό μήκους $H=0.3$ m σε μήκος και εσωτερική διάμετρο $d_k=25$ mm στην κορυφή και $d_\pi=20$ mm στον πυθμένα. Η διάμετρος του πλωτήρα είναι $d_f=20$ mm η πυκνότητά του $\rho_f=4,9$ gr/cm³ και ο όγκος του $V_f=6,6$ cm³. Αν ο συντελεστής του ροταμέτρου είναι $C_d=0,72$ να βρεθεί το ύψος που θα βρίσκεται ο πλωτήρας όταν η παροχή είναι $\dot{V}=100$ cm³/s.

Λύση

$$\dot{V} = C_1 A_2 \sqrt{\frac{2g V_f (\rho_f - \rho)}{\rho \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] A_f}}$$

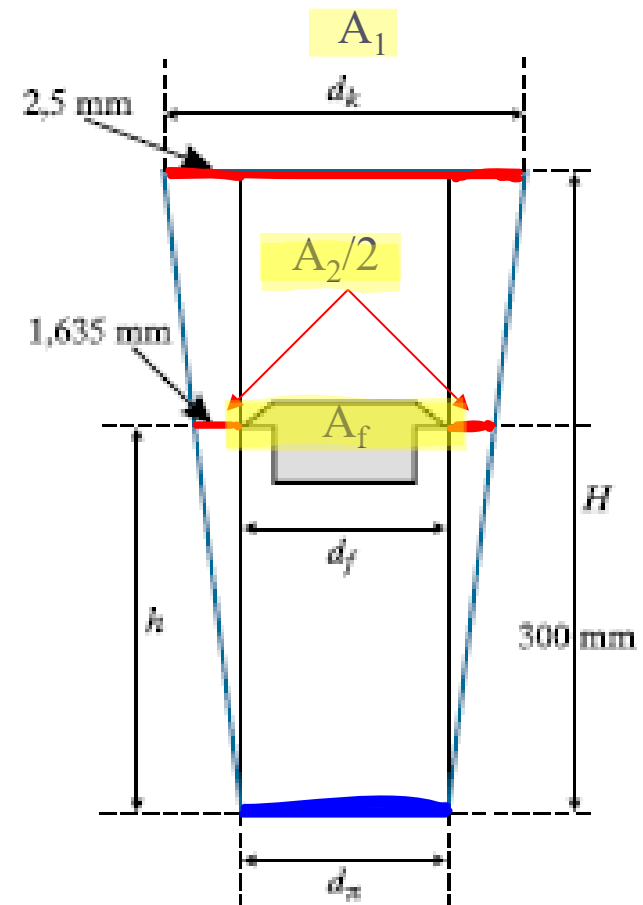
$$A_2 + A_f = A_1$$

$$A_2 = \dots$$

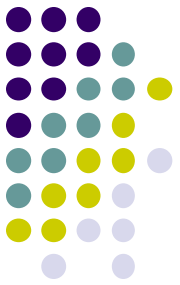
$$d_2 = \dots$$

$d_2 - d_f =$ απόσταση
πλωτήρα από
τοιχώματα

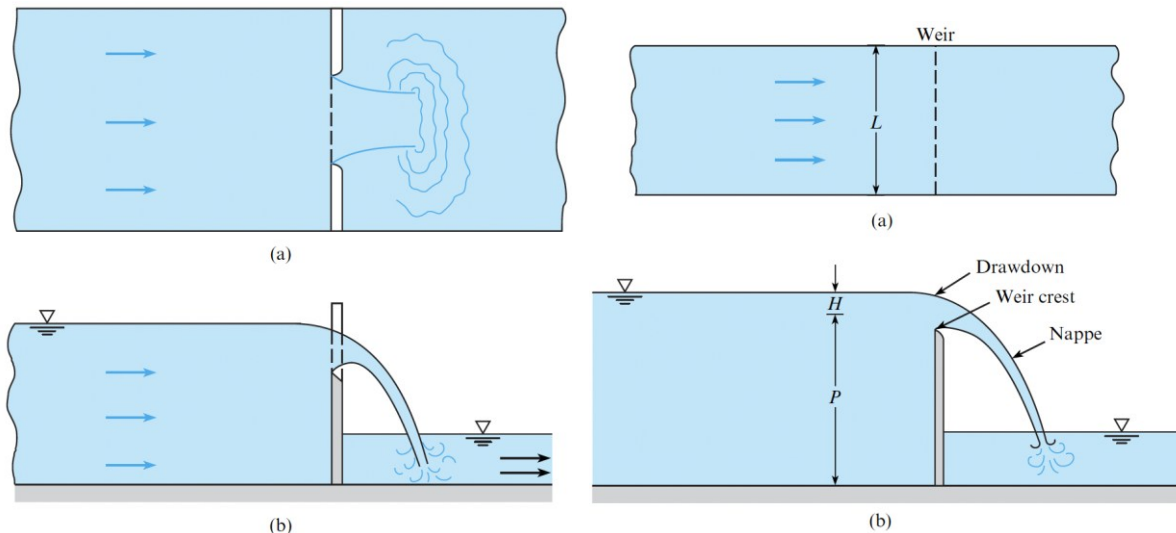
$$\frac{h}{H} = \frac{\frac{d_2 - d_f}{2}}{\frac{d_k - d_f}{2}} \Rightarrow h = \dots$$



Υπερχειλιστές

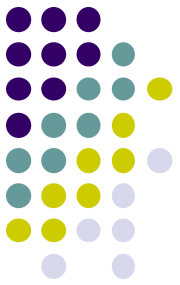


- Μετρούν την παροχή μέσω της πτώσης πίεσης που δημιουργείται από μία λεπτή πλάκα με κυκλική οπή τοποθετημένη μέσα στον αγωγό.
- Η γεωμετρία του υπερχειλιστή (ορθογωνική ή τριγωνική) καθορίζει την ακρίβεια και το εύρος παροχών που μπορεί να μετρηθεί.

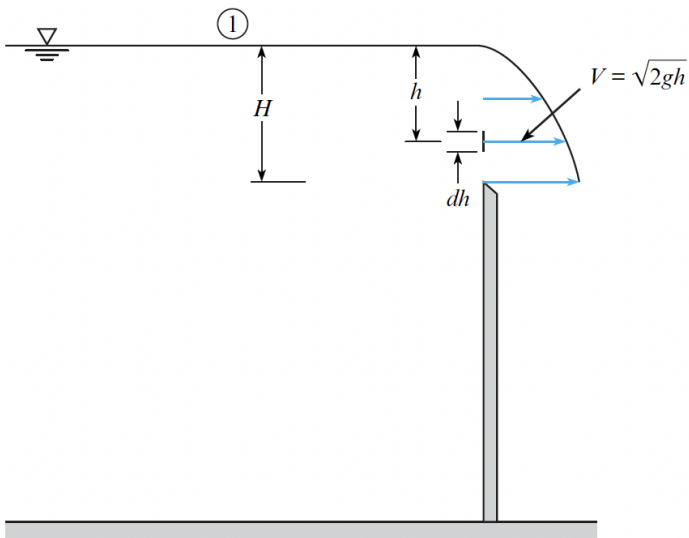


Σχήμα. Ορθογώνιος Υπερχειλιστής με πλευρικές συστολές (αριστερά) και αιχμηρές ακμές (Δεξιά)

Ορθογώνιος Υπερχειλιστής



$$\left. \begin{aligned} \frac{p_1}{\gamma} + H &= (H - h) + \frac{V^2}{2g} \\ p_1 &= 0 \\ V &= \sqrt{2gh} \\ dQ &= \sqrt{2gh} L dh \end{aligned} \right\}$$



$$\begin{aligned} Q &= \int_0^H \sqrt{2gh} L dh \\ &= \frac{2}{3} L \sqrt{2g} H^{3/2} \end{aligned}$$

Σε πραγματικές συνθήκες ροής
υπάρχουν τα φαινόμενα ιξώδους

$$\begin{aligned} Q &= \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} L H^{3/2} \\ &= K \sqrt{2g} L H^{3/2} \end{aligned}$$

Συντελεστής εκροής
Διορθωτικός συντελεστής
που προκύπτει από
πειραματικές μελέτες

EXAMPLE 13.7

Applying a Rectangular Weir to Measure the Flow Rate of Water

Problem Statement

The head on a rectangular weir that is 60 cm high in a rectangular channel that is 1.3 m wide is measured to be 21 cm. What is the discharge of water over the weir?

Define the Situation

- Water flows over a rectangular weir.
- The weir has a height of $P = 0.6$ m and a width of $L = 1.3$ m.
- Head on the weir is $H = 0.21$ m.

State the Goal

Find the discharge (m^3/s).

Generate Ideas and Make a Plan

1. Calculate the flow coefficient K using Eq. (13.17).
2. Calculate flow rate using the rectangular weir equation (13.16).

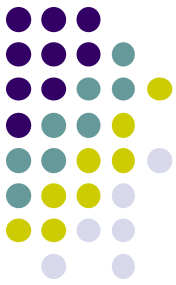
Take Action (Execute the Plan)

1. Flow coefficient:

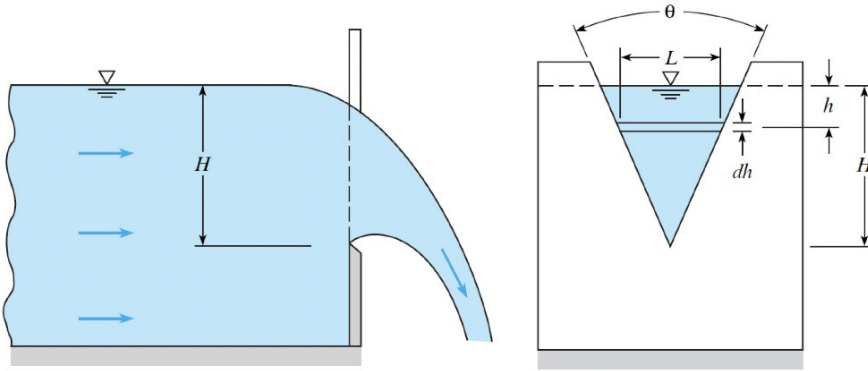
$$K = 0.40 + 0.05 \frac{H}{P} = 0.40 + 0.05 \left(\frac{21}{60} \right) = 0.417$$

2. Discharge:

$$\begin{aligned} Q &= K \sqrt{2g} L H^{3/2} = 0.417 \sqrt{2(9.81)} (1.3) (0.21)^{3/2} \\ &= \boxed{0.23 \text{ m}^3/\text{s}} \end{aligned}$$



Τριγωνικός Υπερχειλιστής



$$dQ = V dA = VL dh \Rightarrow Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) H^{5/2}$$

Χρήση του συντελεστή εκροής

$$Q = \frac{8}{15} C_d \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) H^{5/2}$$

Για τριγωνικούς υπερχειλιστές με γωνία $\theta = 60^\circ$ και $H > 2$ cm πειραματικές μελέτες έχουν δείξει ότι ο συντελεστής εκροής είναι ίσος με 0.58 και η παροχή ισούται με:

$$Q = 0.179 \sqrt{2g} H^{5/2}$$

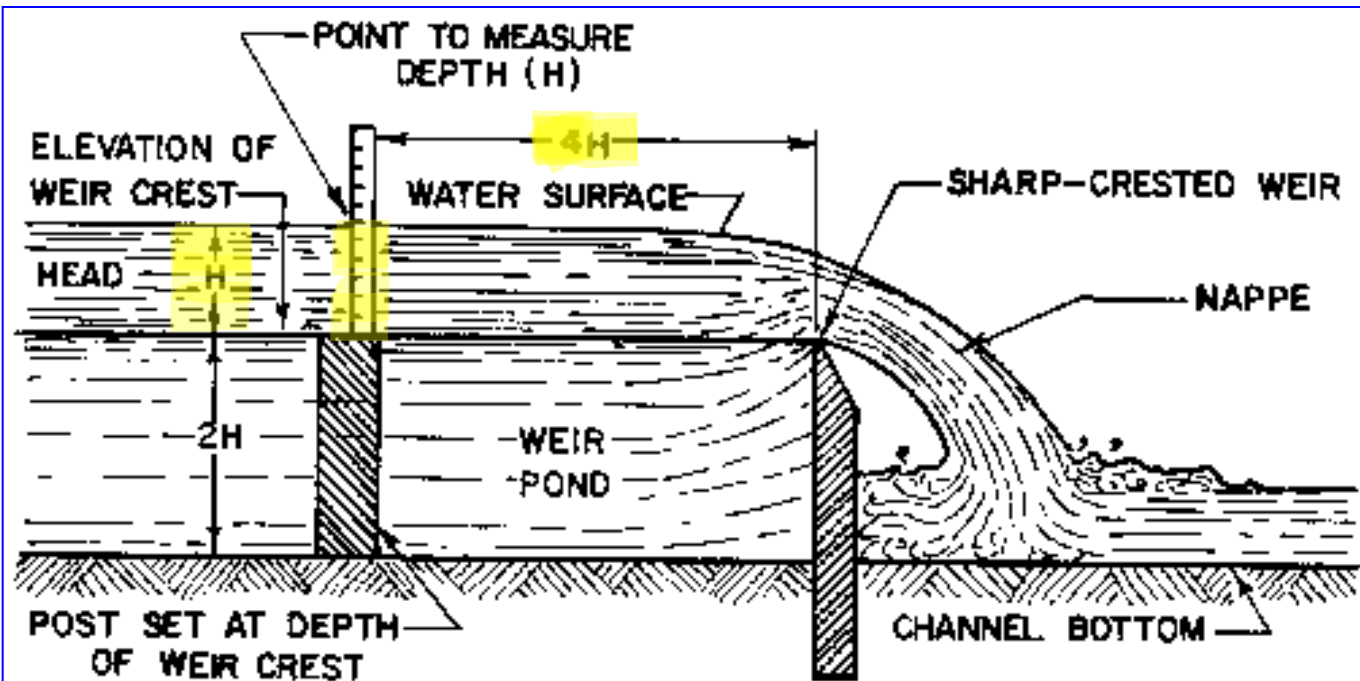
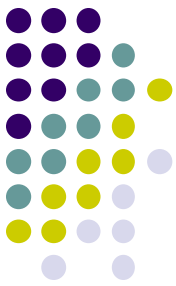
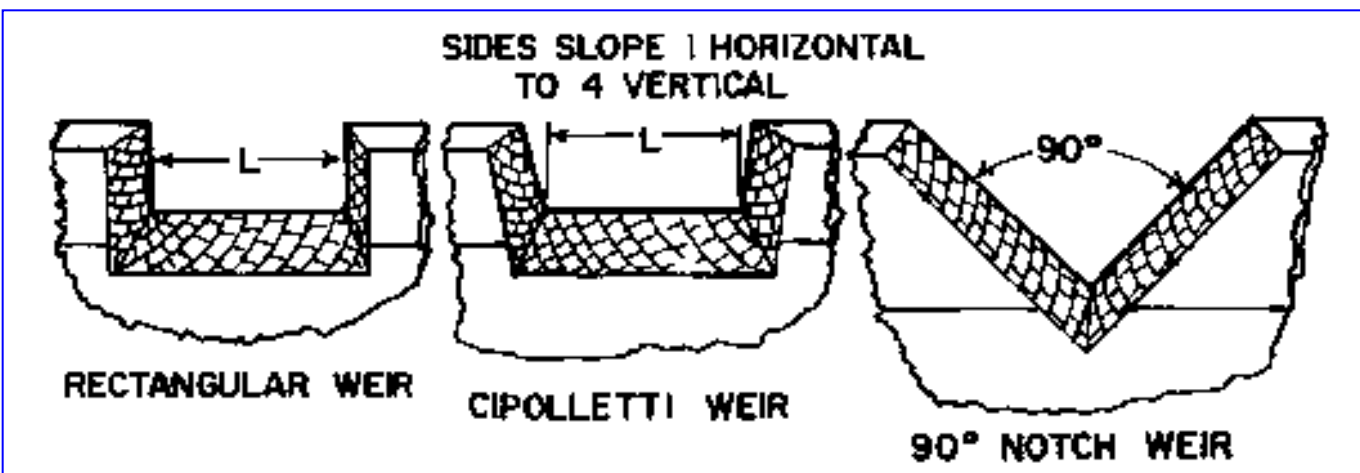
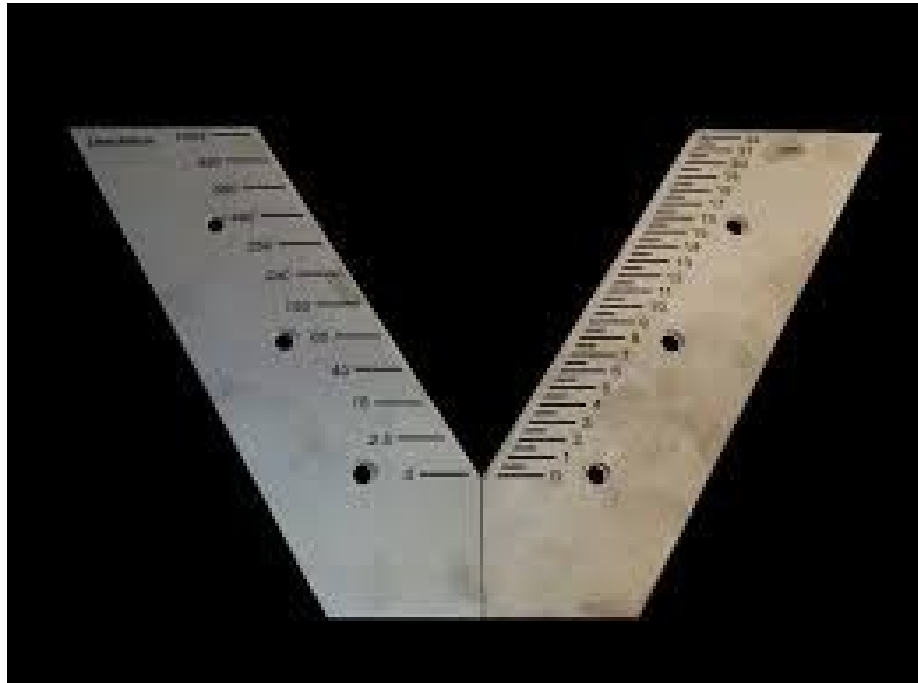


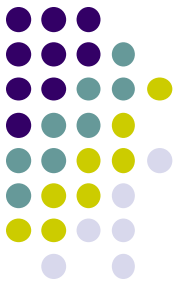
FIGURE 1.—PROFILE OF A SHARP-CRESTED WEIR





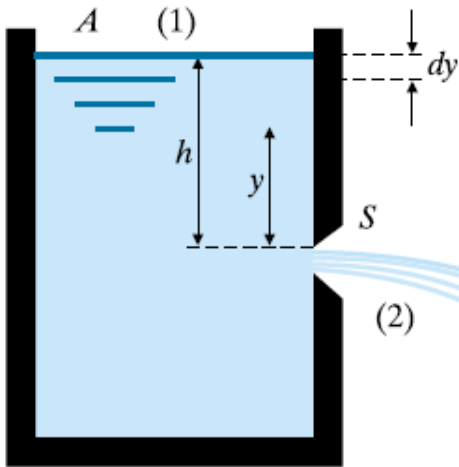
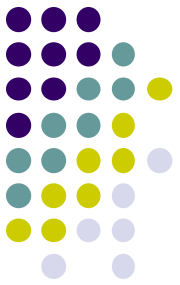


Υπερχειλιστής φράγματος Λούρου



Υπερχειλιστής φράγματος Jordao, Βραζιλία

Μετρητές στομίου σε δεξαμενή



$$\frac{u_1^2}{g} + z_1 + \frac{P_1}{\gamma} = \frac{u_2^2}{2g} + z_2 + \frac{P_2}{\gamma} \Rightarrow z + h = z + \frac{u_2^2}{2} \Rightarrow u = \sqrt{2gh}$$

θεωρητική

$$Q_{th} = A_0 \sqrt{2gh}$$

$$Q_{real} = C_6 A_0 \sqrt{2gh}$$

συντελεστής στομίου

Υπολογισμός του χρόνου εκροής από ύψος h —————> σε ύψος y

$$\left. \begin{aligned} Q &= C_6 A_0 \sqrt{2gh} \\ Q &= -A \frac{dh}{dt} \end{aligned} \right\} \Rightarrow C_6 A_0 \sqrt{2gh} = -A \frac{dy}{dt} \Rightarrow -h^{-1/2} dy = C_6 \frac{A_0}{A} \sqrt{2g} dt \Rightarrow$$

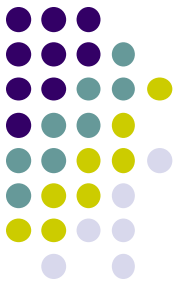
$$-\int_h^y h^{-1/2} dy = C_6 \frac{A_0}{A} \sqrt{2g} \int_0^t dt \Rightarrow t = \frac{2A}{C_6 A_0 \sqrt{2g}} (\sqrt{h} - \sqrt{y})$$

ταχύτητα
κατάπτωσης
της στάθμης

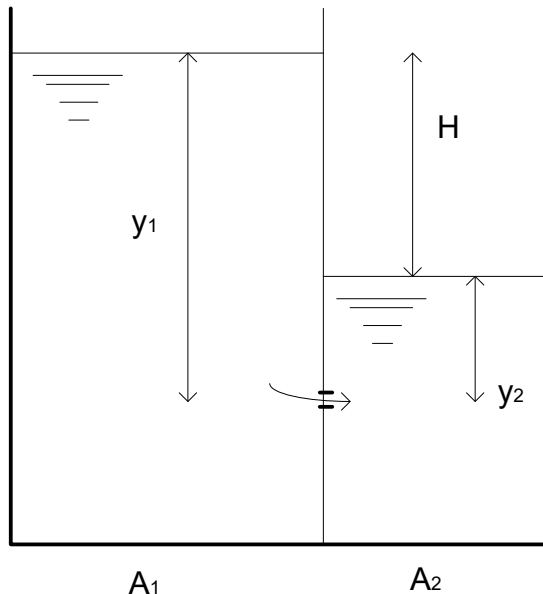
Χρόνος εκκένωσης για $y = 0$

$$t_{ol} = \frac{A}{C_6 A_0} \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

Συγκοινωνούντα δοχεία σε δεξαμενές



Σε πόσο χρόνο το H θα γίνει $H_1, H_2, 0$ κλπ.



$$A_1 dy_1 + A_2 dy_2 = 0 \Rightarrow dy_1 = -\frac{A_2}{A_1} dy_2$$

$$H = y_1 - y_2 \Rightarrow dH = dy_1 - dy_2 = -\frac{A_2}{A_1} dy_2 - dy_2$$

$$\Rightarrow dH = -\left(1 + \frac{A_2}{A_1}\right) dy_2 \Rightarrow dy_2 = -\frac{dH}{\left(1 + \frac{A_2}{A_1}\right)}$$

$$Q dt = C_6 A_0 \sqrt{2gH} dt$$

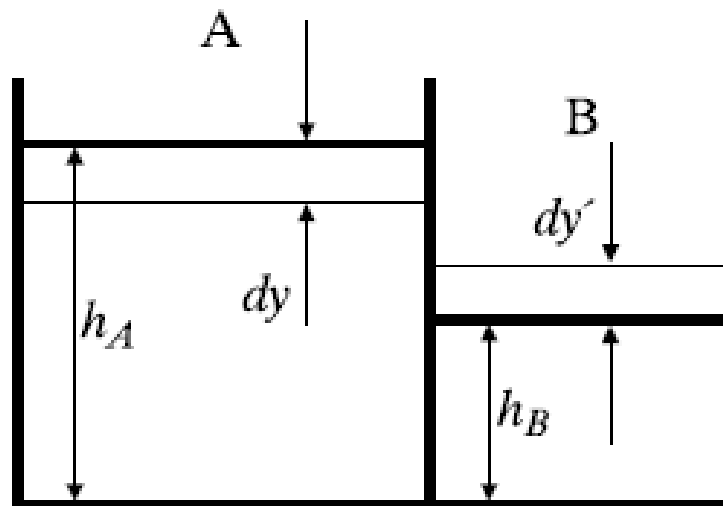
$$Q dt = A_2 dy_2 = A_2 \left(-\frac{dH}{\left(1 + \frac{A_2}{A_1}\right)} \right) \Rightarrow$$

$$C_6 A_0 \sqrt{2g} \sqrt{H} dt = -\frac{dH}{1 + \frac{A_2}{A_1}} A_2 \Rightarrow \int_0^t dt = -\frac{A_2}{C_6 A_0 \sqrt{2g} \left(1 + \frac{A_2}{A_1}\right)} \int_{H_1}^{H_2} H^{-1/2} dH$$

$$\Rightarrow t = \frac{2A_2}{C_6 A_0 \sqrt{2g} \left(1 + \frac{A_2}{A_1}\right)} (\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2})$$

Παράδειγμα 9.4

Δύο δεξαμενές A και B, τετραγωνικής διατομής ακμών $\alpha_1 = 3,66 \text{ m}$ και $\alpha_2 = 1,22 \text{ m}$ αντίστοιχα, βρίσκονται σε επαφή. Στην κοινή πλευρά τους υπάρχει οπή εμβαδού $A_o = 0,023 \text{ m}^2$ και συντελεστού $C_s = 0,9$. Η στάθμη του νερού στην A είναι σε ύψος $h_A = 3 \text{ m}$ και στην B σε ύψος $h_B = 1 \text{ m}$ από την οπή. Να βρεθεί ο χρόνος που απαιτείται έτσι ώστε οι επιφάνειες του νερού στις δύο δεξαμενές να βρεθούν στο ίδιο επίπεδο.



Λύση

Σε κάθε χρονική στιγμή η παροχή μέσω της οπής θα οφείλεται στην διαφορά στάθμης του νερού των δύο δεξαμενών h . Έτσι θα ισχύει:

$$\dot{V} = C_s A_o \sqrt{2gh} = 0,8 \times 0,023 \sqrt{2gh} = 0,0815 \sqrt{h}$$

Σε χρόνο dt ο όγκος νερού που διέρχεται από την οπή είναι,

$$dV = \dot{V} dt = 0,0815 \sqrt{h} dt$$

Στον ίδιο χρόνο η μεταβολή διαφοράς στάθμης είναι dh , και θα πρέπει ο εισερχόμενος όγκος στη δεξαμενή B να είναι ίσος με τον εξερχόμενο όγκο από τη δεξαμενή A. Επομένως αν η στάθμη στη δεξαμενή A μειωθεί κατά dy σε απόλυτη τιμή, στην B θα ανέβει κατά dy' που υπολογίζεται από την ισότητα των δύο όγκων ως:

$$\alpha_1^2 dy = \alpha_2^2 dy' \Rightarrow dy' = \frac{\alpha_1^2}{\alpha_2^2} dy \Rightarrow dy' = \left(\frac{3,66}{1,22} \right)^2 dy = 9 dy$$

Θεωρώντας θετική φορά προς τα κάτω θα ισχύει:

$$-dh = dy - dy' = dy - (-9 dy) \Rightarrow dy = -\frac{dh}{10}$$

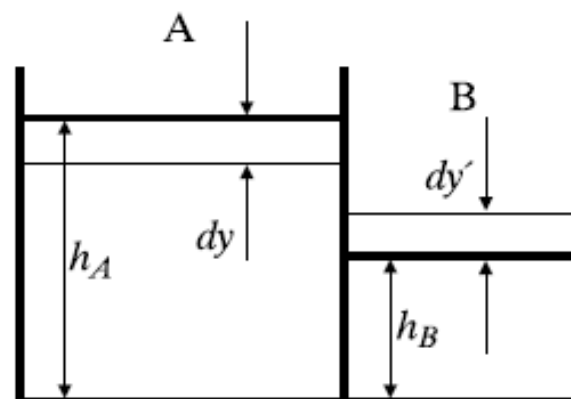
Ο στοιχειώδης όγκος που διέρχεται από την οπή είναι:

$$dV = \alpha_1^2 dy = 3,66^2 \times \left(-\frac{dh}{10} \right) = -1,339 dh$$

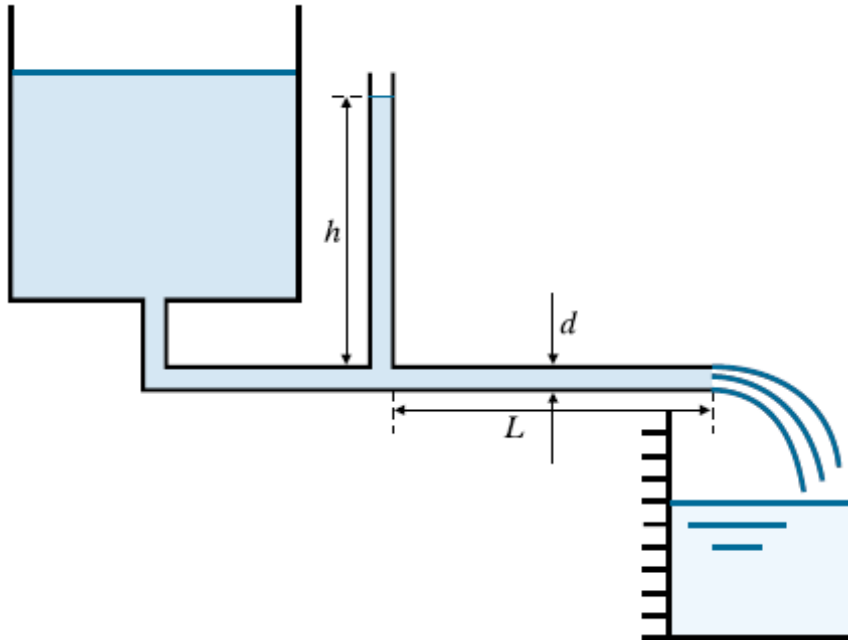
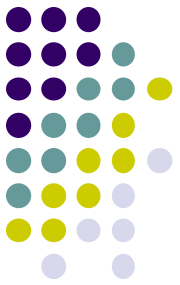
Εξίσωση των δύο σχέσεων που δίνουν τους στοιχειώδεις όγκους παρέχει:

$$0,0815 \sqrt{h} dt = -1,339 dh \Rightarrow dt = -16,43 h^{-1/2} dh \Rightarrow$$

$$\int_0^t dt = -\int_2^0 16,43 h^{-1/2} dh \Rightarrow t = 46,47 \text{ s}$$



Μετρητές ιξώδους (viscometers) - ιξωδόμετρα ροής μέσω αγωγού

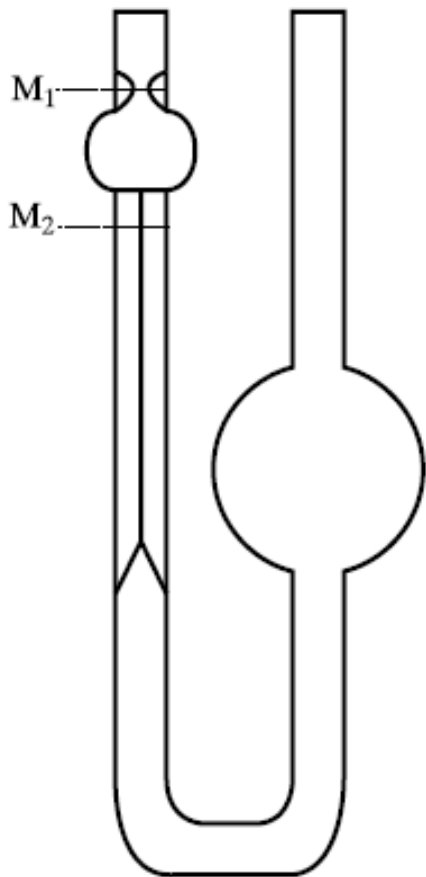
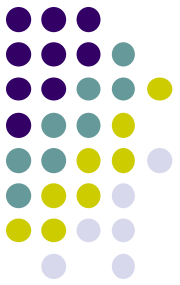


Εξίσωση Hagen-Poiseuille

$$\Delta p = \frac{128\mu L Q}{\pi d^4} \Rightarrow \mu = \frac{\pi \Delta p d^4}{128 Q L} \Rightarrow \mu = \frac{\pi \rho g h d^4}{128 L} \frac{t}{V}$$

$$Q = \frac{V(\text{volume})}{t}$$

Μετρητές ιξώδους (viscometers) - ιξωδόμετρα Ostwald



$$\mu = \frac{\pi \rho g h d^4}{128 \frac{V}{t} L} = \frac{\pi \rho g h d^4 t}{128 L V}$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\pi g h d^4}{128 L V} \times t = k_v t$$

Δηλαδή το κινηματικό ιξώδες είναι ανάλογο του χρόνου εκροής. Επειδή η σταθερά k_v είναι δύσκολο να υπολογισθεί, βρίσκουμε το χρόνο εκροής με ένα υγρό γνωστού κινηματικού ιξώδους ν_0 . Κατόπιν μετρώντας το χρόνο εκροής του άγνωστου υγρού και χρησιμοποιώντας τη σχέση (9.36) υπολογίζουμε το άγνωστο κινηματικό ιξώδες.

$$\frac{\nu}{\nu_0} = \frac{t}{t_0} \quad (9.36)$$

Μετρητές ιξώδους (viscometers) - ιξωδόμετρα βυθιζόμενης σφαίρας

Gilmont ® Falling Ball Viscometer 0.2 to 10 centipoise

EW-08701-00, \$192.00 / each (USD)

Ideal for routine plant quality control checks and research laboratory applications

This viscometer is extremely easy to use;

First fill tube with sample, then invert tube, allowing the ball to enter the PTFE screw.

Next, restore tube to normal position. Finally, turn the knob to release the ball, and measure the time of descent. Reading the viscometer is easy—the ball moves against white background with red reference lines.

Repeatability with good technique varies from ± 0.2 to $\pm 1.0\%$, depending upon time of descent.

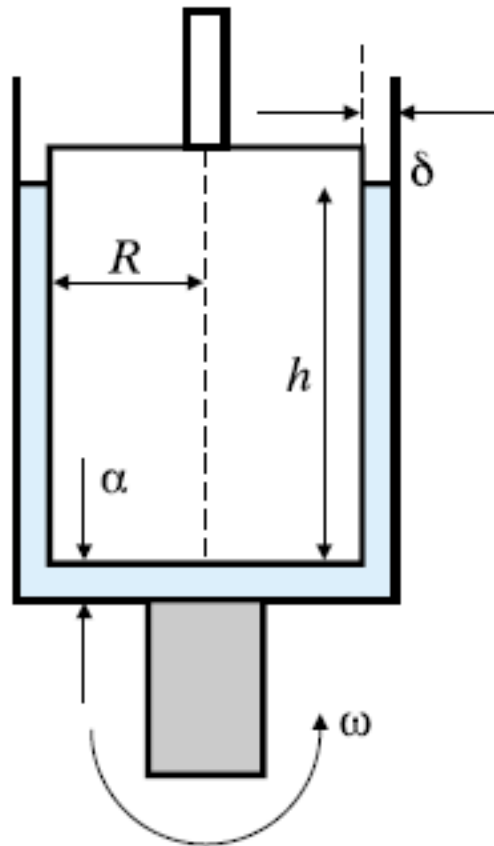
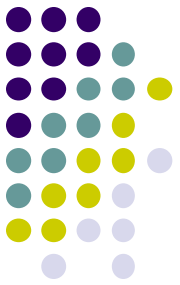
Viscometers require a **7 mL sample volume**. Each viscometer is supplied with one **glass** and one **316 stainless steel** high-precision ball. For higher viscosity ranges, use the optional **tantalum ball** (order separately below table).

Viscometers are made of precision-bore glass tubing with stabilizing beads.



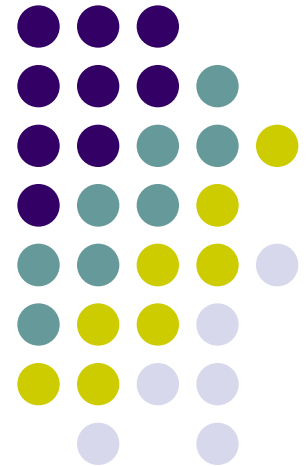
Μετρητές ιξώδους (viscometers)

- περιστρεφόμενο ιξωδόμετρο

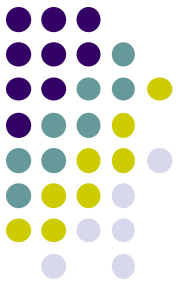


Ρευστομηχανική

Μεταφορά ρευστών – αντλίες

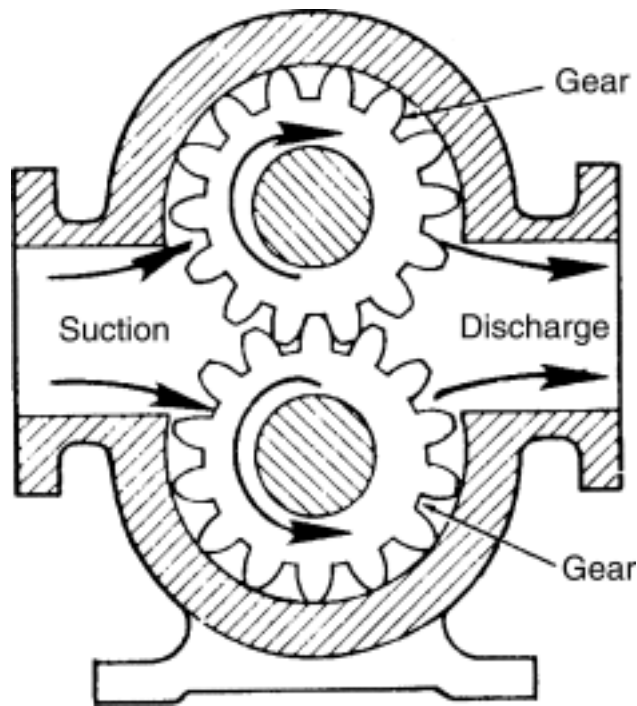
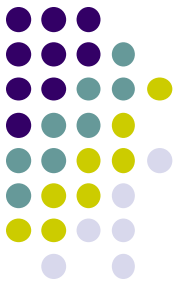


Μηχανές ρευστών



- **Μηχανές θετικής εκτοπίσεως (positive displacement machines):** λειτουργούν εξαναγκάζοντας το ρευστό να εισέρχεται ή να εξέρχεται από έναν θάλαμο (π.χ. τρόμπα ποδηλάτου, οδοντωτή αντλία, ανθρώπινη καρδιά).
 - Παλινδρομικές
 - Περιστροφικές
- **Στροβιλομηχανές (Turbomachines):** περιλαμβάνουν τη ροή του ρευστού μέσα από περιστρεφόμενα πτερύγια ή ρότορες που αφαιρούν ή προσθέτουν ενέργεια στο ρευστό (π.χ. προπέλες, ανεμιστήρες, αντλίες νερού, ανεμόμυλοι και συμπιεστές).
 - Αξονικής, μκτής ή ακτινικής ροής
 - Προσδίδουν (στρόβιλοι) ή αφαιρούν ενέργεια (αντλίες)

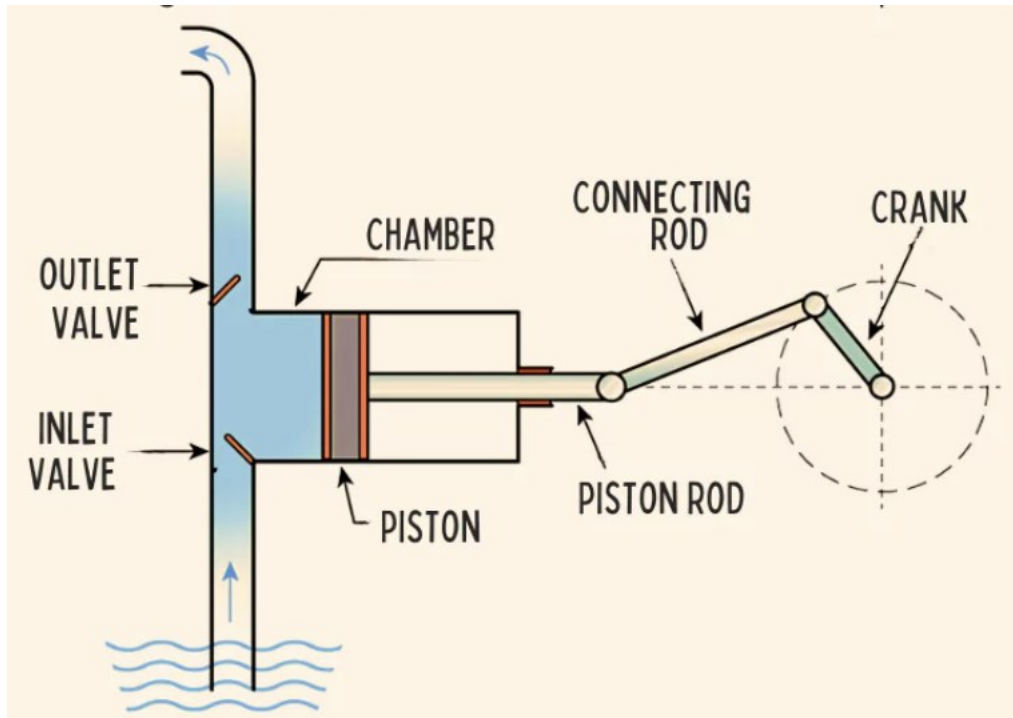
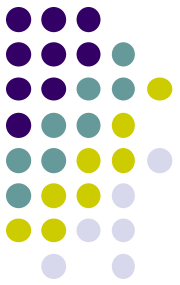
Περιστροφικές αντλίες



Σχήμα. Οδοντωτή αντλία

- Για ρευστά με διαφορετικά ιξώδη, τόσο λεπτόρρευστα όσο και παχύρρευστα
- Παρέχουν σχετικά ομαλή και συνεχόμενη παροχή
- Η απόδοση εξαρτάται από το είδος της αντλίας και της συνθήκες λειτουργίας.

Παλινδρομικές αντλίες



- Για ρευστά με υψηλό ιξώδες.
- Κατάλληλες για χαμηλή παροχή και υψηλή πίεση.
- Σύνθετη κατασκευή και περισσότερες μηχανικές καταπονήσεις.
- Αυτολίπανση.

Σχήμα. Παλινδρομική αντλία με έμβολο,

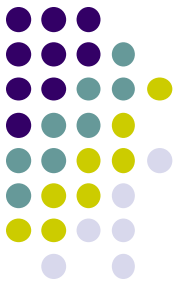
Στροβιλομηχανές



Κατηγορίες Στροβιλομηχανών

	Απορρόφησης Ισχύος	Παραγωγής Ισχύος
Αξονικές μηχανές	• Αξονικές αντλίες • Αξονικοί ανεμιστήρες • Έλικες (προπέλες) • Αξονικοί συμπιεστές	• Αξονικός στρόβιλος (Kaplan) • Ανεμογεννήτρια • Αεριοστρόβιλος
Ακτινικές μηχανές	• Φυγοκεντρική αντλία • Φυγοκεντρικός ανεμιστήρας • Φυγοκεντρικός συμπιεστής	• Στρόβιλος κρούσης (Pelton) • Στρόβιλος αντίδρασης (Francis)

Αντλίες



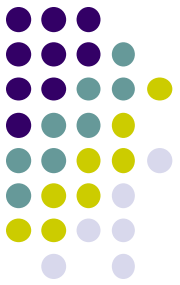
- **Αντλίες αξονικής ροής:**

- Κατάλληλες για χαμηλό μανομετρικό ύψος και υψηλές παροχές.
- Παρόμοια λειτουργία με μία προπέλα.
- Χρησιμοποιούνται σε συστήματα αποστράγγισης χαμηλών περιοχών και σε υδροστροβίλους φραγμάτων χαμηλού ύψους (<30 m).

- **Αντλίες ακτινικής ροής (Φυγοκεντρικές): Αξονικής, μικτής ή ακτινικής ροής**

- Κατάλληλες για μεγαλύτερο μανομετρικό ύψος συγκριτικά με τις αντλίες αξονικής ροής.
- Η λειτουργία τους βασίζεται κυρίως στη φυγοκεντρική επιτάχυνση του ρευστού από την πτερωτή και στη μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε πίεση στο κέλυφος.
- Χρησιμοποιούνται ευρέως σε δίκτυα ύδρευσης, βιομηχανικές διεργασίες, κυκλοφορία ψυκτικών και θερμικών ρευστών, καθώς και σε αντλιοστάσια μεταφοράς σε μεγαλύτερα ύψη.

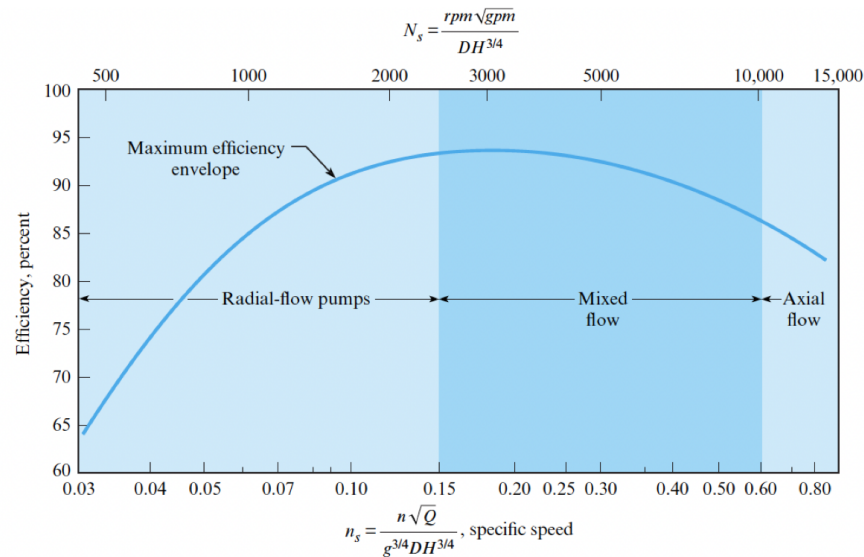
Αντλίες



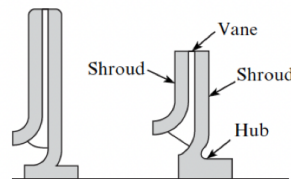
- Επιλογή κατάλληλης αντλίας με βάση την αδιάστατη τιμή της ειδικής ταχύτητας n_s .

FIGURE 14.13

Optimum efficiency and impeller design versus specific speed.



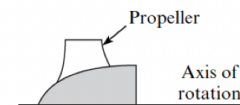
(a) Optimum efficiency and impeller designs versus specific speed, n_s .



(b) Radial-flow impellers.

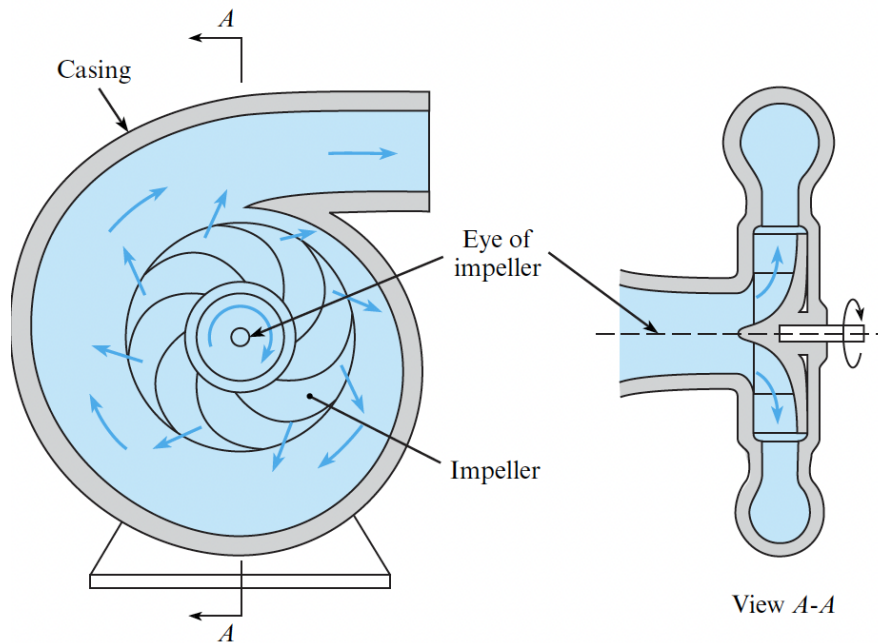
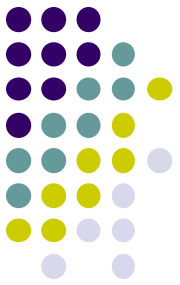


(c) Mixed-flow impellers.



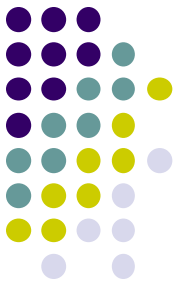
(d) Axial flow.

Φυγοκεντρικές αντλίες



- Για μεγάλη ποικιλία ρευστών και αιωρημάτων στερεών σε υγρά
- Φτερωτές από διάφορα υλικά με ανθεκτικότητα στη διάβρωση
- Μετάδοση κινητικής ενέργειας από τη φτερωτή στο ρευστό

Φυγοκεντρικές αντλίες



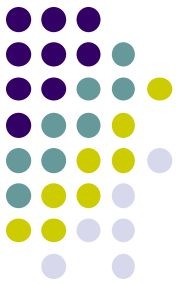
- **Πλεονεκτήματα**

- Είναι απλές στην κατασκευή.
- Δεν χρησιμοποιούν βαλβίδες.
- Λειτουργούν σε υψηλές ταχύτητες και έτσι συνδέονται άμεσα με ηλεκτρικό κινητήρα.
- Χειρίζονται μεγάλη ποικιλία υγρών.
- Έχουν μικρό κόστος συντήρησης.
- Δεν καταστρέφονται αν για μικρό χρόνο παρεμποδιστεί η ροή στο σκέλος κατάθλιψης.

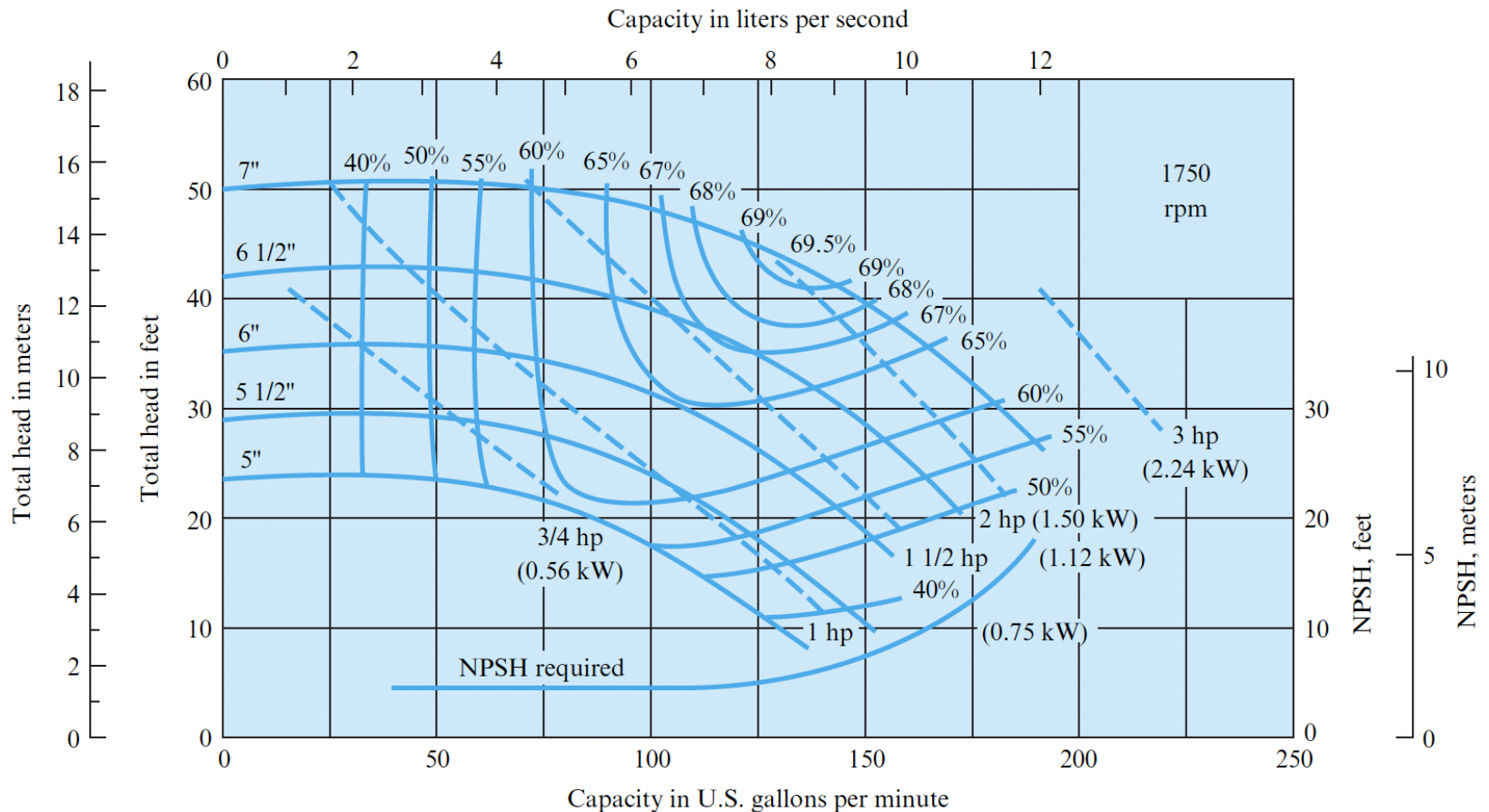
- **Μειονεκτήματα**

- Δεν παρέχουν σε ένα στάδιο πολύ υψηλές πιέσεις.
- Δεν είναι συνήθως αυτοτροφοδοτούμενες.
- Λειτουργούν με υψηλή απόδοση μόνο σε περιορισμένο εύρος συνθηκών λειτουργίας.
- Δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ρευστά μεγάλου ιξώδους.

Φυγοκεντρικές αντλίες



Σχήμα. Καμπύλες λειτουργίας φυγοκεντρικής αντλίας με διαφορετικές φτερωτές, $N=1750\text{rpm}$

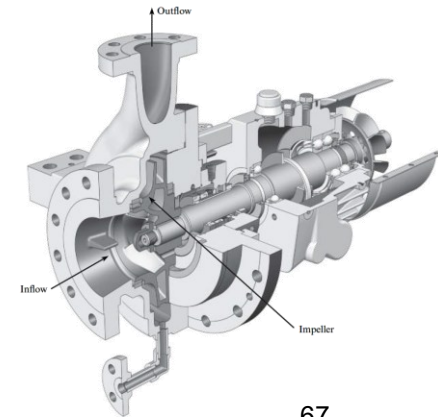


Μεταφορά ρευστών - αντλίες

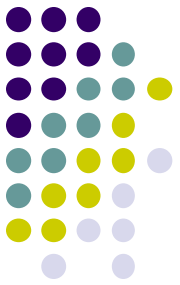


Η μεταφορά ρευστών από ένα σημείο σε ένα άλλο υψηλότερης στάθμης ή πίεσης γίνεται με τη χρήση αντλίας. Η αντλία είναι μια μηχανή που δίνει ενέργεια στο ρευστό ώστε να μπορεί να κινηθεί μέσα από ένα σύστημα σωληνώσεων. Η ενέργεια που χρειάζεται μια αντλία εξαρτάται από:

- Το ύψος στο οποίο πρέπει να ανυψωθεί το ρευστό.
- Το μήκος και την κατάσταση των σωλήνων (τριβές και απώλειες).
- Την ποσότητα ρευστού που θέλουμε να μεταφέρουμε (παροχή).
- Την πίεση που πρέπει να έχει το ρευστό στην έξοδο.
- Το ιξώδες του ρευστού.
- Το βαθμό απόδοσης της αντλίας.



Χαρακτηριστικά μεγέθη αντλίας



- Μανομετρικό ύψος αντλίας, h_a

$$h_a = h_s - h_L$$

$$h_a = \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + z_2 - z_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}$$

- Μανομετρικό ύψος έργου άξονα, h_s

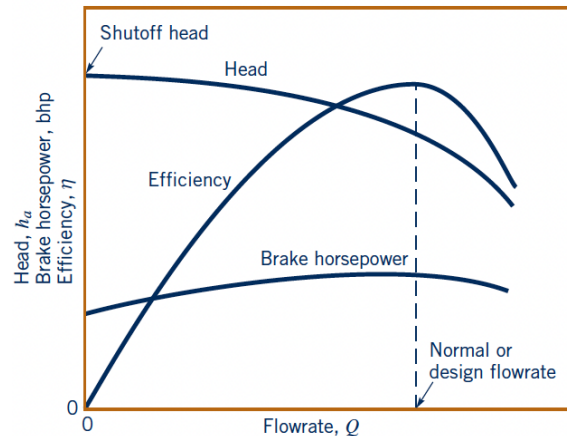
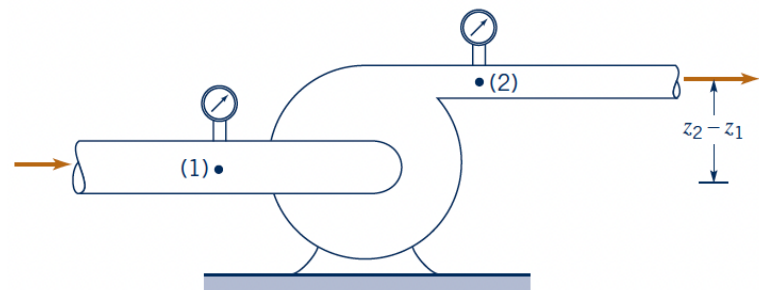
- Ύψος απωλειών αντλίας, h_L

Συνήθως αμελητέες οι διαφορές σε ύψος και ταχύτητα

Οπότε $h_a \approx \frac{p_2 - p_1}{\gamma}$

- Ισχύς που προσφέρει η αντλία στο ρευστό, P_f $\mathcal{P}_f = \gamma Q h_a$

- Συνολικός βαθμός απόδοσης της αντλίας, η $\eta = \frac{\text{power gained by the fluid}}{\text{shaft power driving the pump}} = \frac{\mathcal{P}_f}{\dot{W}_{\text{shaft}}}$



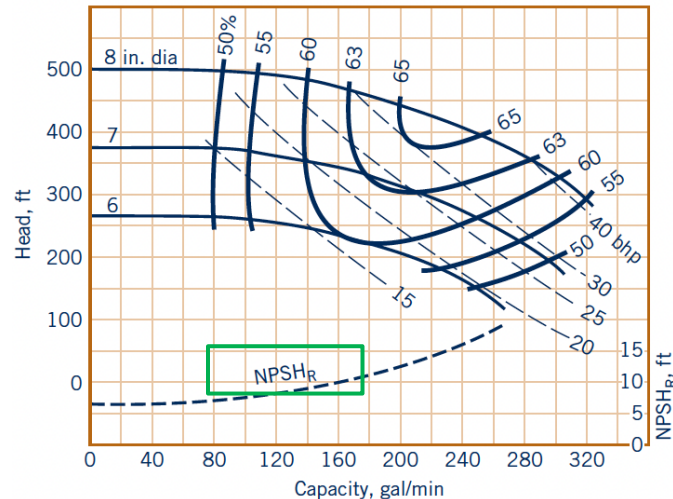
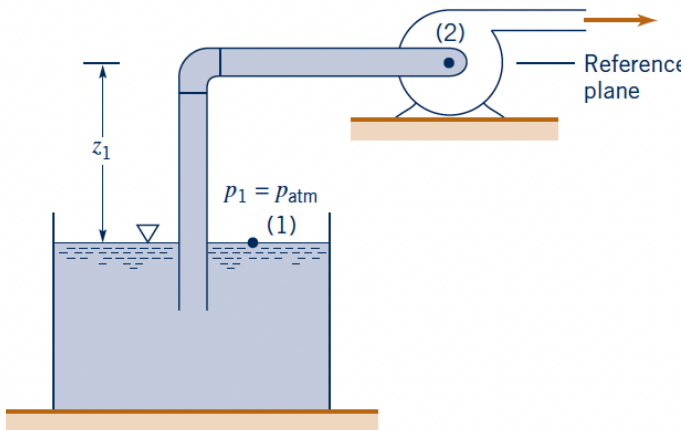
■ **Figure 12.11** Typical performance characteristics for a centrifugal pump of a given size operating at a constant impeller speed.

Χαρακτηριστικά μεγέθη αντλίας



- Ένα ακόμα σημαντικό χαρακτηριστικό μιας αντλίας είναι το NSPH (Net Positive Suction Head) – Καθαρό διαθέσιμο μανομετρικό ύψος αναρρόφησης.
- Μικρές τιμές του NSPH οδηγούν σε σπηλαίωση, που μειώνει την απόδοση και φθείρει την αντλία
- $NPSH_A$ εξαρτάται από τη διάταξη και τις συνθήκες του συστήματος άντλησης, ενώ το $NPSH_R$ είναι χαρακτηριστικό της αντλίας (καμπύλες κατασκευαστή).
- Για ασφαλή λειτουργία και αποφυγή σπηλαίωσης $NPSH_A \geq NPSH_R$

$$NPSH_A = \frac{P_{atm}}{\gamma} - z_1 - \sum h_L - \frac{P_v}{\gamma}$$



■ **Figure 12.12** Performance curves for a two-stage centrifugal pump operating at 3500 rpm. Data given for three different impeller diameters.



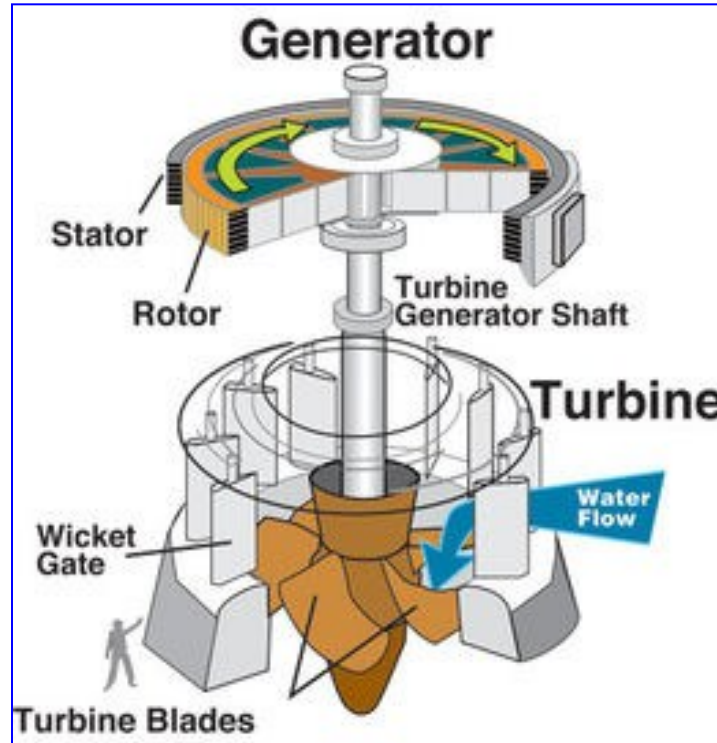
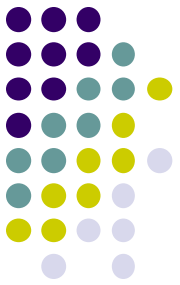
Ροή ρευστού – μείωση πίεσης μέχρι την τάση ατμών του – βρασμός – εμφάνιση φυσσαλίδων – μεταφορά φυσσαλίδων με το ρευστό σε περιοχές μεγαλύτερης πίεσης – σύνθλιψη φυσσαλίδων – θόρυβος ή/και κραδασμοί - **ΣΠΗΛΑΙΩΣΗ**

Αν (οι φυσσαλίδες) κοντά στα τοιχώματα – δημιουργία μεγάλων, τοπικών πιέσεων με αποτέλεσμα – **ΔΙΑΒΡΩΣΗ**

Λιγότερο συχνά εμφανίζεται στο σκέλος της κατάθλιψης (λόγω αυξημένης πίεσης) και συχνότερα στο σκέλος της αναρρόφησης, όπου (ιδιαίτερα αν η αντλία εργάζεται αντλώντας ρευστό από χαμηλότερη στάθμη η πίεση μπορεί να πέσει κάτω από την τιμή της πίεσης ατμών του ρευστού στη συγκεκριμένη θερμοκρασία.

Απώλεια μάζας π.χ. έως 100 mg / 2 hrs λειτουργίας (αναλόγως το υλικό, π.χ. μαλακός χάλυβας)

Σπηλαίωση



Σχήμα. Καταστροφή τουρμπίνας Francis εξαιτίας σπηλαίωσης.

EXAMPLE 14.7

Calculating Net Positive Suction Head

Problem Statement

In Fig. 14.14, the pump delivers 2 cfs flow of 80°F water, and the intake pipe diameter is 8 in. The pump intake is located 6 ft above the water surface level in the reservoir. The pump operates at 1750 rpm. What are the net positive suction head and the traditional suction specific speed for these conditions?

Define the Situation

A pump delivers 2 cfs flow of 80°F water.

Assumptions:

1. Entrance loss coefficient = 0.10.
2. Bend loss coefficient = 0.20.

Properties: Water at 80°F: Table A.5, $\gamma = 62.2 \text{ lbf/ft}^3$, and $p_{\text{vap}} = 0.506 \text{ psi}$.

State the Goal

- Calculate the positive suction head (NPSH).
- Calculate the traditional suction specific speed (N_{ss}).

Generate Ideas and Make a Plan

The net positive suction head is the difference between pressure at pump inlet and the vapor pressure.

1. Determine the atmospheric pressure in head of water for reservoir surface.
2. Determine velocity in 8 in. pipe.
3. Apply the energy equation between the reservoir and pump entrance.
4. Calculate NPSH.
5. Calculate N_{ss} with $N_{ss} = (NQ^{1/2})/(\text{NPSH})^{3/4}$.

Take Action (Execute the Plan)

1. Pressure head at reservoir:

$$\frac{p_1}{\gamma} = \frac{14.7 \text{ lbf/in}^2 \times 144 (\text{in}^2/\text{ft}^2)}{62.2 \text{ lbf/ft}^3} = 34 \text{ ft}$$

2. Velocity in pipe:

$$V_2 = \frac{Q}{A} = \frac{2 \text{ cfs}}{\pi \times ((4 \text{ in})/12)^2} = 5.73 \text{ ft/s}$$

3. Energy equation between points 1 and 2:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + \sum h_L$$

- Input values:

$$V_1 = 0, \quad z_1 = 0, \quad z_2 = 6$$

- Head loss:

$$\sum h_L = (0.1 + 0.2) \frac{V_2^2}{2g}$$

- Head at pump entrance:

$$\begin{aligned} \frac{p_2}{\gamma} &= \frac{p_1}{\gamma} - z_2 - \frac{V_2^2}{2g} (1 + 0.3) \\ &= 34 - 6 - 1.3 \times \frac{5.73^2}{2 \times 32.2} = 27.3 \text{ ft} \end{aligned}$$

4. Vapor pressure in feet of head:

$$0.506 \times 144/62.2 = 1.17 \text{ ft.}$$

Net positive suction head:

$$\text{NPSH} = 27.3 - 1.17 = 26.1 \text{ ft}$$

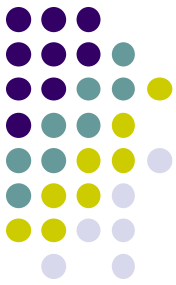
5. Traditional suction specific speed:

$$Q = 2 \text{ cfs} = 898 \text{ gpm}$$

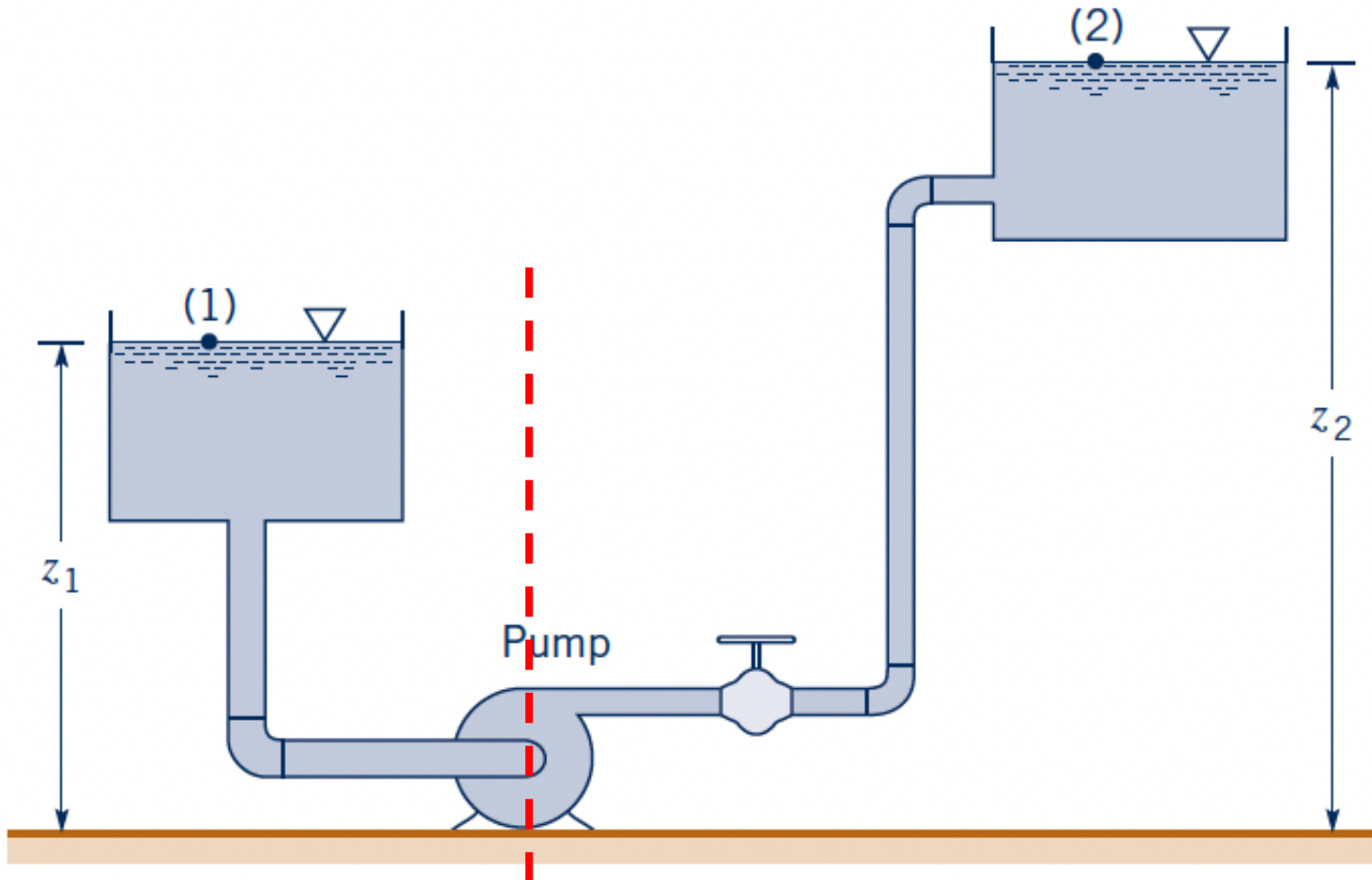
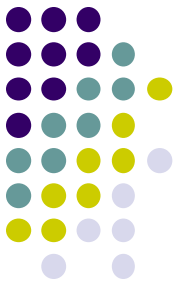
$$N_{ss} = (1750)(898)^{1/2}/(26.1)^{3/4} = \boxed{4540}$$

Review the Solution and the Process

1. *Discussion.* For a typical single-stage centrifugal pump with an intake diameter of 8 in. and pumping 2 cfs, the critical NPSH is normally about 10 ft; therefore, the pump of this example is operating well within the safe range with respect to cavitation susceptibility.
2. *Discussion.* This value of N_{ss} is much below the critical limit of 8500; therefore, it is in a safe operating range so far as cavitation is concerned.



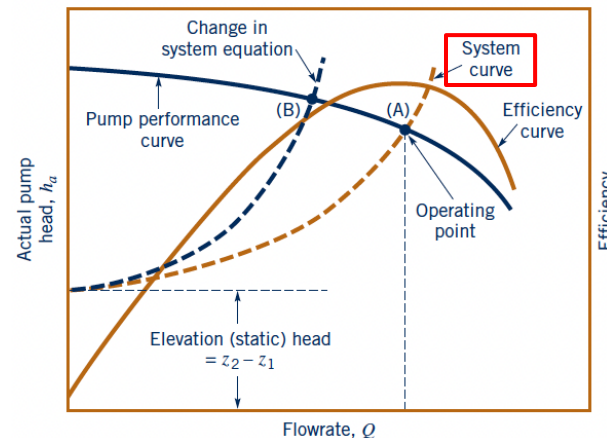
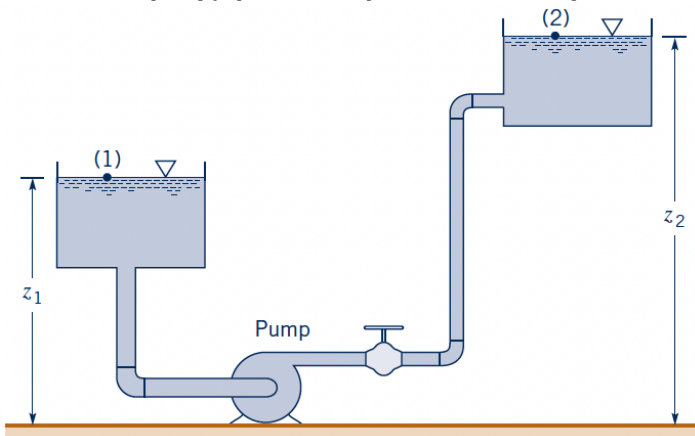
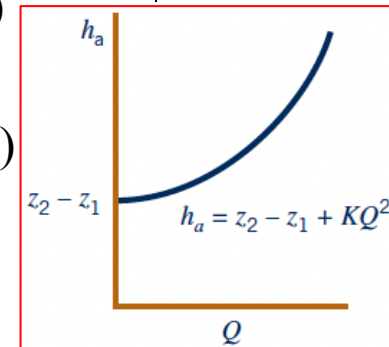
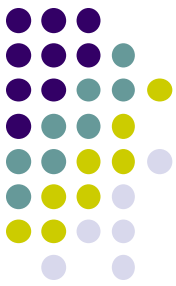
Σύστημα άντλησης υγρών



Σχήμα. Σύστημα άντλησης.

Σύστημα άντλησης υγρών

- Εξίσωση ενέργειας μεταξύ (1) και (2): $h_a = z_2 - z_1 + \sum h_L$
- $\sum h_L$: οι συνολικές απώλειες που σχετίζονται με τις απώλειες τριβές στις σωληνώσεις, και τις δευτερεύοντες απώλειες (σύνδεσμοι, βαλβίδες κ.ά.)
- Σε ένα σύστημα, όπως στο αριστερό σχήμα $h_L \propto Q^2$
- Εξίσωση συστήματος άντλησης: $h_a = z_2 - z_1 + KQ^2$ (εξίσωση συστήματος)
- Το σημείο λειτουργίας είναι η τομή της καμπύλης συστήματος και της καμπύλης της αντλίας.
- Μεταβολές στις αντιστάσεις του συστήματος μετακινούν την καμπύλη συστήματος και αλλάζουν το σημείο λειτουργίας, συνήθως μειώνοντας τη παροχή και την απόδοση.



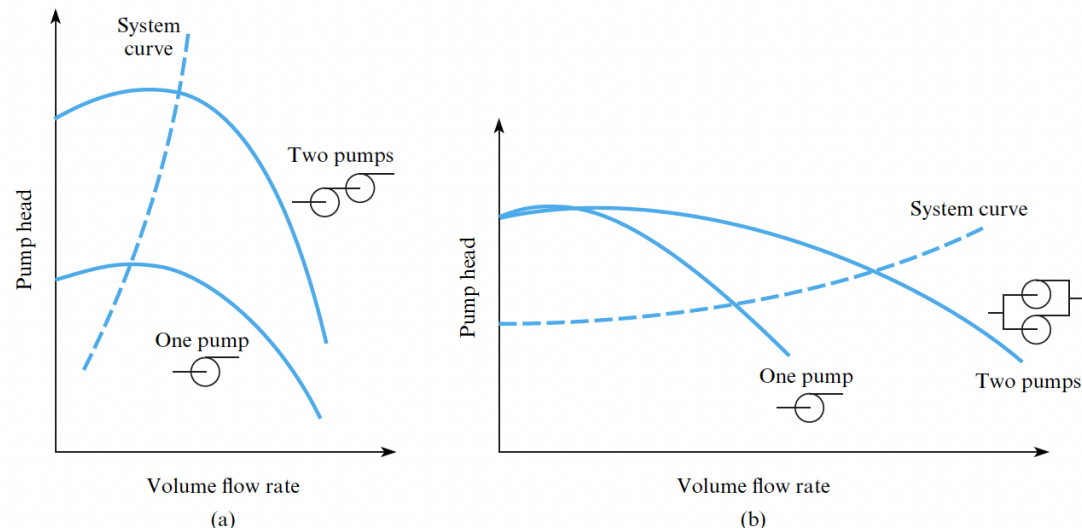
■ **Figure 12.15** Utilization of the system curve and the pump performance curve to obtain the operating point for the system.

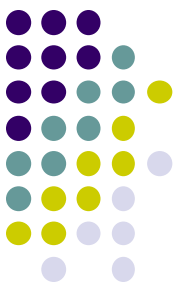
Σύστημα άντλησης υγρών

- Οι αντλίες σε ένα σύστημα άντλησης μπορούν να τοποθετηθούν είτε σε σειρά είτε παράλληλα.
- Οι αντλίες σε σειρά αυξάνουν το συνολικό μανομετρικό ύψος προσθέτοντας τα ύψη κάθε αντλίας στην ίδια παροχή.
- Οι αντλίες σε παράλληλη σύνδεση αυξάνουν τη συνολική παροχή προσθέτοντας τις παροχές κάθε αντλίας στο ίδιο μανομετρικό ύψος.
- Και στις δύο περιπτώσεις, η πραγματική αύξηση σε ύψος ή παροχή περιορίζεται από την καμπύλη του συστήματος, οπότε ούτε το ύψος ούτε η παροχή διπλασιάζονται ακριβώς.

FIGURE 14.18

Pump performance curves for pumps connected in series (a) and in parallel (b).





Νερό μεταφέρεται μεταξύ δύο δεξαμενών που έχουν διαφορά στάθμης 15 m. Οι αγωγοί μεταφοράς έχουν μήκος συνολικό $L=70$ m και διάμετρο $d=300$ mm. Ο συντελεστής τριβής είναι $f=0,025$ και ο συντελεστής δευτερευουσών απωλειών $\Sigma K=2,5$. Η εξίσωση που περιγράφει την καμπύλη της αντλίας είναι $\Delta h_p = 22,9 + 10,7\dot{V} - 111\dot{V}^2$ να βρεθεί η παροχή της αντλίας και το μανομετρικό ύψος που παρέχει εάν α) λειτουργεί μόνη της, β) συνδέεται παράλληλα με όμοιά της. Δίδονται $\rho=1000$ kg/m³.

$$\Delta h_s = (z_k - z_a) + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} - \frac{u_k^2 - u_a^2}{2g} + \frac{8}{\pi^2 g} \left(f \frac{L_a + L_k}{d^5} + \frac{\Sigma K}{d^4} \right) \dot{V}^2$$

α) Από την εξίσωση (10.20) και θεωρώντας ότι στις δύο δεξαμενές η πίεση είναι ατμοσφαιρική έχουμε:

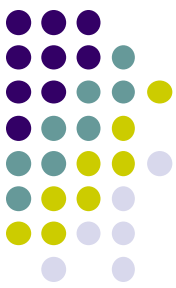
$$\Delta h_s = 15 + \frac{8}{3,14^2 \times 9,81} \left(0,025 \frac{70}{0,3^5} + \frac{2,5}{0,3^4} \right) \dot{V}^2 \Rightarrow \Delta h_s = 15 + 85\dot{V}^2$$

Στο σημείο λειτουργίας θα πρέπει το ύψος της αντλίας να είναι ίσο με το ύψος του συστήματος. Έτσι θα έχουμε:

$$15 + 85\dot{V}^2 = 22,9 + 10,7\dot{V} - 111\dot{V}^2 \Rightarrow \dot{V} = 0,23 \text{ m}^3/\text{s}$$

Συνεπώς το συνολικό μανομετρικό ύψος στο σημείο λειτουργίας είναι:

$$\Delta h = 15 + 85 \times 0,23^2 = 19,5 \text{ m}$$



Νερό μεταφέρεται μεταξύ δύο δεξαμενών που έχουν διαφορά στάθμης 15 m. Οι αγωγοί μεταφοράς έχουν μήκος συνολικό $L=70$ m και διάμετρο $d=300$ mm. Ο συντελεστής τριβής είναι $f=0,025$ και ο συντελεστής δευτερευουσών απωλειών $\Sigma K=2,5$. Η εξίσωση που περιγράφει την καμπύλη της αντλίας είναι $\Delta h_p=22,9+10,7\dot{V}-111\dot{V}^2$ να βρεθεί η παροχή της αντλίας και το μανομετρικό ύψος που παρέχει εάν α) λειτουργεί μόνη της, β) συνδέεται παράλληλα με όμοιά της. Δίδονται $\rho=1000$ kg/m³.

$$\Delta h_s = (z_k - z_a) + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} - \frac{u_k^2 - u_a^2}{2g} + \frac{8}{\pi^2 g} \left(f \frac{L_a + L_k}{d^5} + \frac{\Sigma K}{d^4} \right) \dot{V}^2$$

β) Αν η παροχή των δύο παραλλήλων αντλιών είναι $\dot{V}$, τότε η κάθε μία θα έχει παροχή $\dot{V}/2$, η τιμή της οποίας θα πρέπει να ικανοποιεί την εξίσωση λειτουργίας της αντλίας. Δηλαδή:

$$\Delta h_p = 22,9 + 10,7 \frac{\dot{V}}{2} - 111 \left(\frac{\dot{V}}{2} \right)^2 \Rightarrow \Delta h_p = 22,9 + 5,35 \dot{V} - 27,75 \dot{V}^2$$

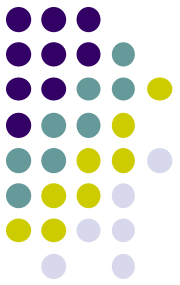
Σύμφωνα με τα προηγούμενα θα έχουμε:

$$15 + 85 \dot{V}^2 = 22,9 + 5,35 \dot{V} - 27,75 \dot{V}^2 \Rightarrow \dot{V} = 0,29 \text{ m}^3/\text{s}$$

Το μανομετρικό ύψος σε αυτή τη περίπτωση είναι:

$$\Delta h = 15 + 85 \times 0,29^2 = 22,2 \text{ m}$$

Άντληση αερίων



Μικρότερη πυκνότητα μεταφερόμενου ρευστού (αέριο)

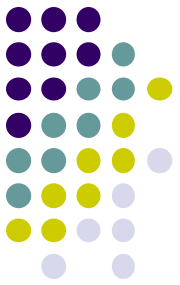
Μεγαλύτερη πιθανότητα διαφυγής (όχι διάκενα)

Μετατροπή ενέργειας σε θερμότητα, χρήση συστημάτων ψύξης

- **Αντλίες αερίων**

- Παλινδρομικού τύπου (ίδιες με τις αντίστοιχες των υγρών)
- Ανεμιστήρες (αξονικοί, ακτινωτοί)
- Περιστροφικοί συμπιεστές
- Αντλίες κενού (για τη δημιουργία και τη διατήρηση υποπίεσης)

Στρόβιλοι



- Οι στρόβιλοι μετατρέπουν την ενέργεια που συνδέεται με την κίνηση ενός ρευστού σε έργο στον άξονα.
- Οι υδροστρόβιλοι κατηγοριοποιούνται ως εξής:
 - Ο στρόβιλος κρούσης αποτελείται από έναν πίδακα υγρού που προσπίπτει στα πτερύγια ενός τροχού ή δρομέα στροβίλου.
 - Ο στρόβιλος αντίδρασης αποτελείται από μια σειρά περιστρεφόμενων πτερυγίων που βρίσκονται μέσα στο ρέον ρευστό. Η πίεση πάνω στα πτερύγια δημιουργεί τη ροπή που παράγει την ισχύ.
- Οι ανεμογεννήτριες κατηγοριοποιούνται ως εξής:
 - Ο δρομέας μιας ανεμογεννήτριας μπορεί να περιστρέφεται γύρω από οριζόντιο άξονα (εμπορικές ανεμογεννήτριες).
 - Ο δρομέας μιας ανεμογεννήτριας μπορεί να περιστρέφεται γύρω από κατακόρυφο άξονα (ανεμογεννήτρια Darrieus και ανεμογεννήτρια Savonius).

Στρόβιλοι

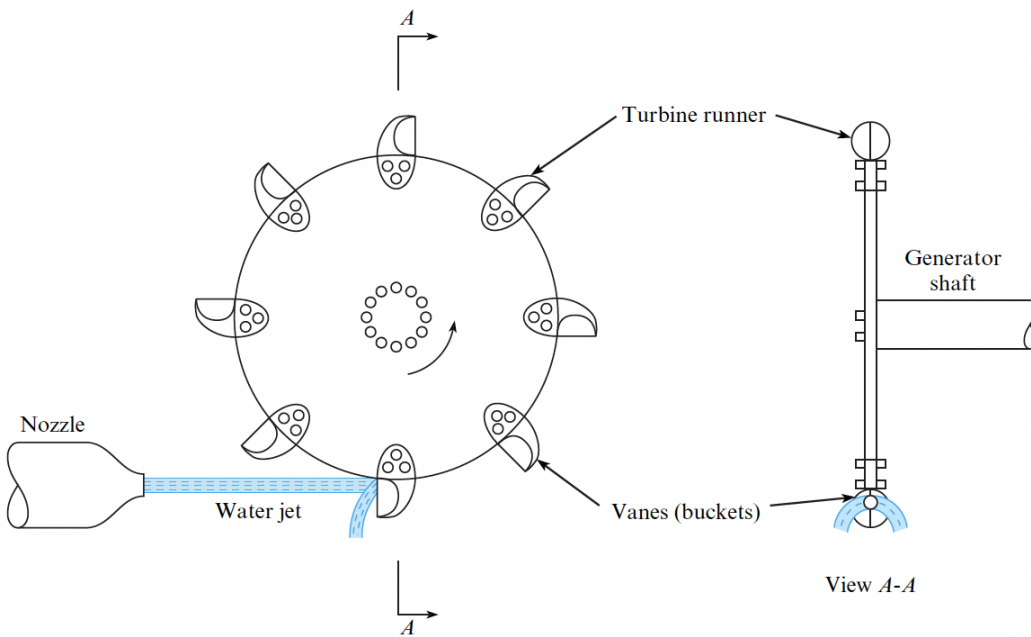
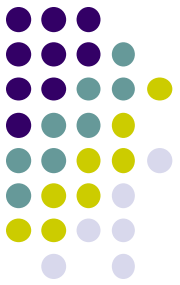
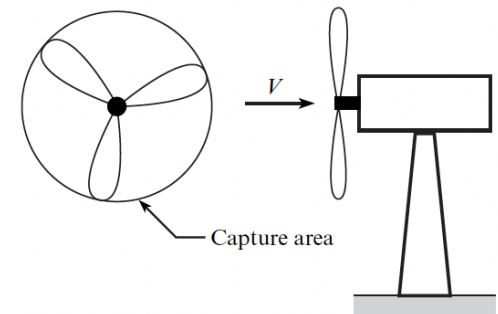


FIGURE 14.19

Impulse turbine.

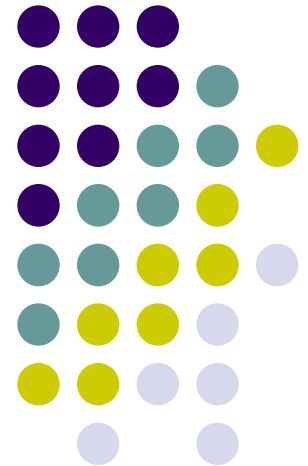
FIGURE 14.24

Horizontal-axis wind turbine showing capture area.

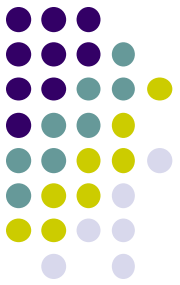


Ρευστομηχανική

Μη Νευτώνεια ρευστά



Εισαγωγή

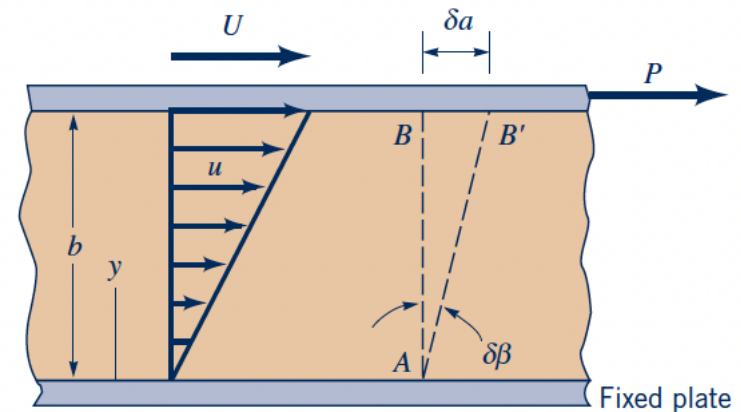


- Το ιξώδες είναι ένα μέτρο αντίστασης του ρευστού στη κίνηση του ή στη παραμόρφωση υπό την επίδραση διατμητικής τάσης.
- Περιγράφει πόσο έντονα το ρευστό αντιστέκεται στη σχετική κίνηση μεταξύ γειτονικών στρωμάτων.
- Η διατμητική τάση είναι ευθέως ανάλογη του **ρυθμού διάτμησης**.
- Για Νευτώνεια ρευστά η διατμητική τάση και ο ρυθμός διάτμησης μπορούν να συσχετισθούν μέσω της σχέσης $\tau = \mu \frac{du}{dy}$, όπου η σταθερά αναλογίας συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα μ και ονομάζεται δυναμικό ιξώδες.

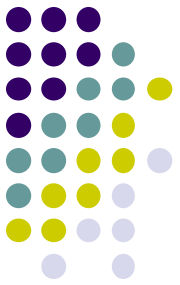
Ρυθμός διάτμησης

$$\dot{\gamma} = \frac{U}{b} = \frac{du}{dy}$$

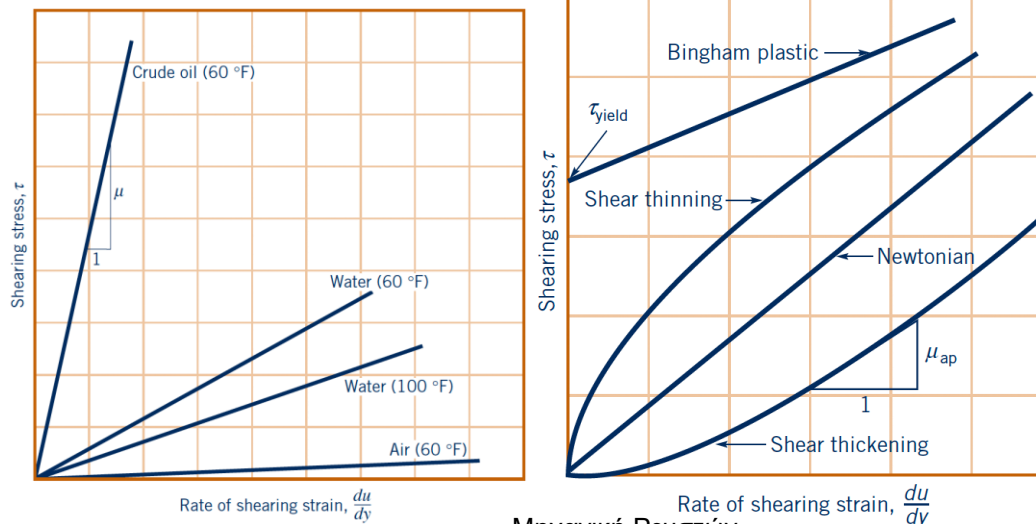
$$\tau \propto \dot{\gamma}$$
$$\tau \propto \frac{du}{dy}$$



Εισαγωγή



- **Newtonian ρευστά:** Ρευστά για τα οποία η διατμητική τάση είναι γραμμικά ανάλογη του ρυθμού διάτμησης.
- **Μη-Newtonian ρευστά:** Ρευστά για τα οποία η διατμητική τάση δεν είναι γραμμικά ανάλογη του ρυθμού διάτμησης.
- Η κλίση της καμπύλης διατμητικής τάσης ως προς τον ρυθμό διάτμησης ονομάζεται φαινόμενο ιξώδες.
- Για τα Newtonian ρευστά, το φαινόμενο ιξώδες είναι ίσο με το ιξώδες και είναι ανεξάρτητο από τον ρυθμό διάτμησης.



Κατηγορίες Μη-Newtonian ρευστών



- Το ιξώδες μεταβάλλεται με το ρυθμό διάτμησης ή τη διατμητική τάση, αλλά είναι ανεξάρτητο του χρόνου $\tau = f(\dot{\gamma})$

(αν 1^ο βαθμού το ρευστό είναι Νευτώνειο)

➤ *Shear-thinning ρευστά* ($\tau = k\dot{\gamma}^n$, $0 < n < 1$)

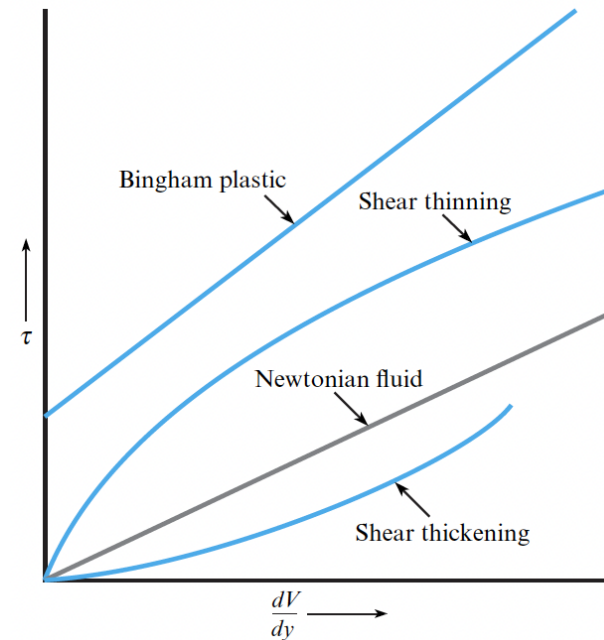
- Το φαινόμενο ιξώδες μειώνεται με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης.
- Για πολύ μεγάλους και πολύ μικρούς ρυθμούς διάτμησης έχουν Νευτώνεια συμπεριφορά
- k : Δείκτης συνοχής, πόσο ιξώδες είναι το ρευστό,
- n : ποσοστό απόκλισης από Νευτώνεια συμπεριφορά
- (π.χ. λιπαντικά μηχανών, μελάνι εκτύπωσης)

➤ *Shear-thickening ρευστά* ($\tau = k\dot{\gamma}^n$, $n > 1$)

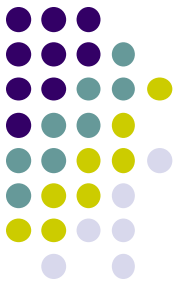
- Το φαινόμενο ιξώδες αυξάνεται με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης.
- (π.χ. υγρό τσιμεντοσκυρόδεμα, αιωρήματα στερεών σε υγρά)

➤ Πλαστικά κατά Bingham (*Bingham plastics*) ($\tau - \tau_0 = \mu_p \dot{\gamma}$)

- Παραμόρφωση του ρευστού για $\tau < \tau_0$
- Ροή Νευτώνεια για $\tau > \tau_0$,
- (π.χ. οδοντόπαστα, μαγιονέζα)



Κατηγορίες Μη-Newtonian ρευστών



- Το ιξώδες μεταβάλλεται (και) με το χρόνο εφαρμογής της διατμητικής τάσης, $\tau = f(\dot{\gamma}, t)$

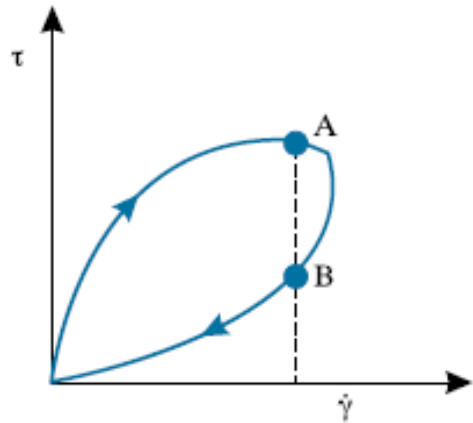
- Θιξοτροπικά (*Thixotropic*)

- Μείωση του φαινομένου ιξώδους με το χρόνο επενέργειας της διατμητικής τάσης (π.χ. χρώματα βαφής, στο κουτί μεγάλο ιξώδες για να μην αποχωρίζονται οι χρωστικές από το διαλύτη, στο ανακάτεμα-επάλειψη μείωση ιξώδους, στο στέγνωμα, αύξηση ιξώδους)

- Τα σημεία A και B αντιστοιχούν σε 2 διαφορετικές τιμές διατμητικής τάσης για τον ίδιο ρυθμό διάτμησης, αλλά και για διαφορετική διάρκεια επενέργειας της διατμητικής τάσης

- Ρεοπηκτικά (*reoplectic*)

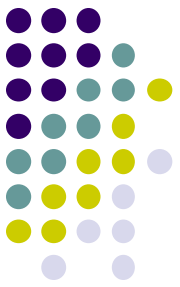
- Αντίθετη συμπεριφορά, αύξηση του φαινομένου ιξώδους με το χρόνο επενέργειας της διατμητικής τάσης (π.χ. μπετονίτης)

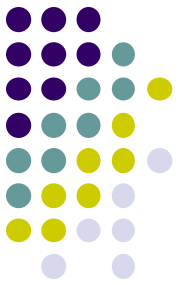


Type of fluid	Behaviour	Characteristics	Examples
Plastic solids	Perfectly plastic	Strain (παραμόρφωση) does not result in opposing stress	Ductile metals (ελατά) past the yield point (σημείο παραμόρφωσης)
	Bingham plastic	Linear relationship between shear stress (διατμητική τάση) and rate of strain once threshold shear stress exceeded	Οδοντόπαστα
	Yield pseudo-plastic	Pseudo-plastic above some threshold shear stress	Mud , some colloids , λάσπη γεωτρήσεων
	Yield dilatant	Dilatant above some threshold shear stress	
Power-law fluids (generalized Newtonian fluids)	Pseudoplastic or "shear thinning"	Apparent viscosity reduces with increasing rate of shear	Some colloids , clay , milk , gelatin , blood and liquid cement , λιπαντικά, μελάνι εκτύπωσης, κόλλα ταπετσαρίας
	Dilatant (διαστελλόμενα) or "shear thickening"	Apparent viscosity increases with increasing rate of shear	Concentrated solution of sugar in water , suspensions of rice starch or corn starch , υγρό τσιμεντοσκυρόδεμα
Viscoelastic - having both viscous and elastic properties	Maxwell material	"Series" linear combination of elastic and viscous effects	metals , composite materials
	Kelvin material	"Parallel" linear combination of elastic and viscous effects	Bitumen (άσφαλτος), dough (ζύμη), nylon , and Silly Putty (στόκος)
	Anelastic	Material returns to a well-defined "rest shape"	
Time-dependent viscosity	Rheopectic	Apparent viscosity increases with duration of stress	Some lubricants , μπετονίτης
	Thixotropic	Apparent viscosity decreases with duration of stress	Non-drip paints (χρώματα βαφής), tomato ketchup and most honey varieties.
Generalized Newtonian fluids (idealized fluid)		Stress depends on normal and shear strain rates and also the pressure applied on it	Blood , Custard (γαλακτόπιτα)

Τραγωδία του Aberfan, 1966

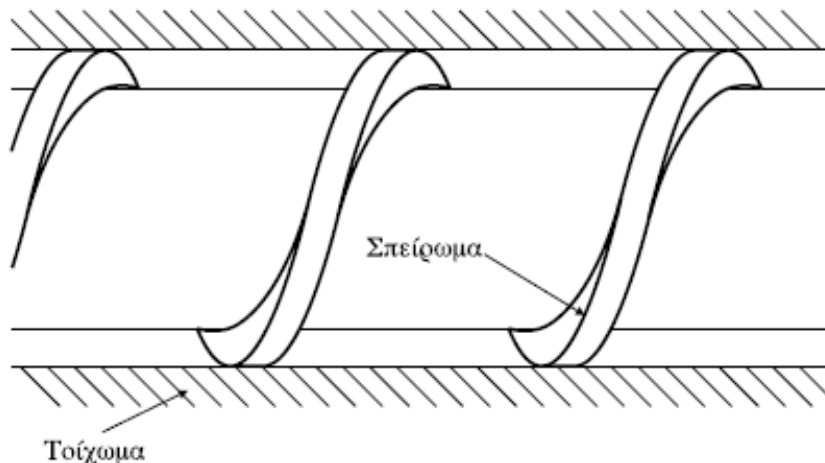
(Κατάρρευση θιξοτροπικών τελμάτων, 144 νεκροί, 114 παιδιά)





Άντληση Non-Newtonian ρευστών

- Το ιξώδες τους μεταβάλλεται συναρτήσει της διατμητικής τάσης και/ή του χρόνου διάτμησης, γεγονός που επηρεάζει άμεσα τη ροϊκή συμπεριφορά κατά τη μεταφορά.
- Η πτώση πίεσης σε αγωγούς δεν περιγράφεται επαρκώς από τις κλασικές εξισώσεις για Newtonian ρευστά και απαιτεί χρήση κατάλληλων ρεολογικών μοντέλων.
- Η υδραυλική σχεδίαση (αντλίες, αγωγοί, αναμεικτήρες) πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη μεταβλητότητα του φαινομένου ιξώδους και την πιθανή ύπαρξη τάσης διαρροής.
- Η επιλογή εξοπλισμού απαιτεί συνεκτίμηση τόσο υδραυλικών όσο και ρεολογικών παραμέτρων για την αποφυγή αστάθειας, υπερφόρτωσης ή μη αποδοτικής λειτουργίας.



Χρήση αντλιών σπειρώματος για την περίπτωση υγρών υψηλού ιξώδους (η ροή οφείλεται ακριβώς στις ιξώδεις δυνάμεις, π.χ. πολυμερή).